

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

**ЭНЕРГЕТИКА**

Том 67, № 6  
2024

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

**Учредитель**

Белорусский национальный технический университет

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

*22 декабря – День энергетика*

**СОДЕРЖАНИЕ**

**ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА**

- Павлович И. А., Барайшук С. М., Муродов М., Набиев М.** Способ внесения смесей для оптимизации заземления при монтаже вертикальных составных заземлителей ..... 475
- Высоцкий, М. Э.** Выбор конструктивного устройства кабельных линий напряжением 10 кВ по критерию минимума приведенных затрат ..... 488

**ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА**

- Пехота А. Н., Хрусталеv Б. М., Голубев В. П., Нгуен Тху Нга, Ву Минь Фап.** Разработка технологических вариантов использования различных отходов в качестве альтернативных источников энергии на основе многокомпонентных составов твердого топлива ..... 501
- Ольшанский А. И., Котов А. А., Кузьменков С. М.** Температура в процессе конвективной сушки тонких плоских влажных материалов ..... 516
- Зеленухо Е. В., Цыганова А. А., Бельская Г. В., Хрипович А. А.** Обоснование использования биогаза для производства энергии в Республике Беларусь ..... 530
- Седнин В. А., Седнин А. В., Бондарович А. И., Некало И. А., Мухин А. Д.** Анализ фактического состояния предизолированных трубопроводов систем централизованного теплоснабжения после эксплуатации ..... 544
- Перечень статей, опубликованных в журнале «Энергетика» в 2024 г.**
- I. Тематический указатель** ..... 558
- II. Именной указатель** ..... 561

**Главный редактор Александр Михайлович Маляревич**

**Редакционная коллегия**

- К. В. ДОБРЕГО* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),  
*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),  
*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. ПИСЬМЕННИЙ* (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),  
*Ф. А. РОМАНИЮК* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),  
*В. Ю. РУМЯНЦЕВ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),  
*А.-С. С. САУХАТАС* (Рижский технический университет, Рига, Латвийская Республика),  
*В. С. СЕВЕРЯНИН* (Брестский государственный технический университет, Брест, Республика Беларусь),  
*В. А. СЕДНИН* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),  
*Б. С. СОРОКА* (Институт газа НАН Украины, Киев, Украина),  
*В. А. СТРОЕВ* (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),  
*Е. В. ТОРОПОВ* (Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация),  
*Г. Н. УЗАКОВ* (Каршинский инженерно-экономический институт, Карши, Республика Узбекистан),  
*Б. М. ХРУСТАЛЕВ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),  
*Л. В. ШЕНЕЦ* (РУП «Белинвестэнерго», Минск, Республика Беларусь)

**Ведущий научный редактор В. Н. Гурьянчик**

Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 марта 2024 г.  
Регистрационный номер 1257

---

Подписано к печати 29.11.2024. Формат бумаги 60×84<sup>1/8</sup>. Бумага мелованная.  
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. 7,8. Тираж 35 экз.  
Дата выхода в свет . 2024. 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](mailto:energy@bntu.by); <http://energy.bntu.by>

---

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 3820000006896 от 03.03.2014.  
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65

© Белорусский национальный технический университет, 2024

PROCEEDINGS OF THE CIS  
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS  
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

**ENERGETIKA**

V. 67, No 6  
2024

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL  
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

**Founder**

Belarusian National Technical University

---

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

*22<sup>nd</sup> December – Day of Power Engineer*

**CONTENTS**

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

- Pavlovich I. A., Baraishuk S. M., Murodov M., Nabiev M.** A Method of Applying Mixtures to Optimize Grounding during Installation of Vertical Composite Grounding Devices . . . . . 475
- Vysotski M. E.** The Choice of a Construction Arrangement for Cable Lines with a Voltage of 10 kV According to the Criterion of the Minimum Expected Cost . . . . . 488

HEAT POWER ENGINEERING

- Pekhota A. N., Khrustalev B. M., Golubev V. P., Nguyen Thuy Nga, Vu Minh Phap.** Development of Technological Options for the Use of Various Wastes as Alternative Energy Sources Based on Multicomponent Compositions of Solid Fuels . . . . . 501
- Ol'shanskii A. I., Kotow A. A., Kuzmenkov S. M.** Temperature During Convective Drying of Thin Flat Wet Materials . . . . . 516
- Zelianukha A. V., Tsyhanava H. A., Belskaya H. V., Khrypovich H. A.** Justification of the Use of Biogas for Power Generation in the Republic of Belarus . . . . . 530
- Sednin V. A., Sednin A. V., Bondarovich A. I., Nekalo I. N., Mukhin A.S.** Analysis of the Actual Condition of Pre-Insulated Pipelines of District Heating Systems After Operation . . . . . 544

**List of Papers Published in “Energetika” Journal, 2024**

- I. Thematic index** . . . . . 558
- II. Name index** . . . . . 561

**Editor-in-Chief Aliaksandr M. Maliarevich**

**Editorial Board**

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

**Lead Science Editor V. N. Guryanchyk**

**Publication is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus in 2024, March, 19<sup>th</sup>  
Reg. No 1257**

---

Passed for printing 29.11.2024. Dimension of paper 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Coated paper.  
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 11,5.  
An edition of 35 copies. Date of publishing 2024. 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](mailto:energy@bntu.by); <http://energy.bntu.by>

---

Printed in BNTU. License LP 3820000006896 from 03.03.2014.  
220013, Minsk, 65, Nezavisimosty Ave.

© Belarusian National Technical University, 2024

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-475-487>

УДК 621.316.99

## Способ внесения смесей для оптимизации заземления при монтаже вертикальных составных заземлителей

И. А. Павлович<sup>1</sup>, С. М. Барайшук<sup>1</sup>, М. Муродов<sup>2</sup>, М. Набиев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»  
(Минск, Республика Беларусь),

<sup>2</sup>Наманганский инженерно-строительный институт (Наманган, Республика Узбекистан)

**Реферат.** В статье рассмотрен способ применения смесей для оптимизации электрофизических параметров заземляющих устройств совместно с вертикальными составными заземлителями. Установлено, что колебания удельного сопротивления грунта, вызванные изменениями погодных-климатических условий, могут привести к нестабильности сопротивления контура заземления. Исследование показывает, что без соответствующих мер сопротивление контура в результате сезонных изменений свойств грунтов может превысить допустимые значения. Это чревато отклонениями сопротивления растеканию тока заземляющих устройств вне пределов допустимых параметров. Для компенсации этих колебаний предлагается способ уменьшения коэффициента сезонности. Снижение сезонности играет важную роль при обеспечении безопасности обслуживающего персонала и сельскохозяйственных животных путем поддержания сопротивления заземляющего устройства в пределах нормативно установленных значений. Обсуждаются методы искусственного уменьшения сопротивления контура заземления, включая увеличение его размеров и использование глубоких заземлителей. Приведены результаты вертикального электродного зондирования грунта в местах заложения заземлителей, показано влияние влажности на удельное сопротивление грунта, рассмотрено влияние слоистости грунта и наличия влагонасыщенных слоев грунта. Предложены способ, позволяющий вносить смесь совместно с вертикальным составным заземлителем, конструкции муфты, наконечника и вспомогательного устройства, проведены экспериментальные исследования предложенных конструкций и представлены результаты измерения сопротивления растеканию тока такого заземлителя как со стандартными, так и с предложенными муфтами. Проведено сравнение с заземлителем без применения смесей. Результаты измерений демонстрируют, что с увеличением длины заземлителя, его диаметра и объема вводимой смеси сопротивление снижается. Показано, что предложенное решение позволяет снизить сезонность в 1,64–2,1 раза в зависимости от применяемых муфт и получить заземлитель с эквивалентным диаметром в десятки раз большим, чем диаметр составного заземлителя. Авторы предлагают использование грунтозамещающих смесей для снижения удельного сопротивления грунта и обеспечения стабильности контура заземления в течение всего срока эксплуатации. Предложенный метод внесения смесей без

---

### Адрес для переписки

Барайшук Сергей Михайлович  
УО «Белорусский государственный аграрный  
технический университет»  
просп. Независимости, 99,  
223023, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 29 775-76-37  
bear\_s@rambler.ru

### Address for correspondence

Baraishuk Siarhei M.  
Belarusian State Agrarian  
Technical University  
99, Nezavisimosty Ave.,  
223023, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 29 775-76-37  
bear\_s@rambler.ru

---

предварительного бурения позволяет снизить затраты на строительство заземляющих устройств.

**Ключевые слова:** безопасность персонала, сопротивление заземления, нормативные значения, удельное сопротивление грунта, климатические условия, коэффициент сезонности, заземляющие электроды, глубинные заземлители, влажность грунта, температурные изменения, многослойность грунта, подземные воды, грунтозамещающие смеси, гидрогель, графит, глина, эксплуатационная стабильность, снижение затрат, бурение скважин, электропроводность грунта, вертикальное электродное зондирование

**Для цитирования:** Способ внесения смесей для оптимизации заземления при монтаже вертикальных составных заземлителей / И. А. Павлович [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 6. С. 475–487. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-475-487>

## A Method of Applying Mixtures to Optimize Grounding during Installation of Vertical Composite Grounding Devices

I. A. Pavlovich<sup>1</sup>, S. M. Baraishuk<sup>1</sup>, M. Murodov<sup>2</sup>, M. Nabiev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2</sup>Namangan Engineering–Construction Institute (Namangan, Republic of Uzbekistan)

**Abstract.** The article considers the method of using mixtures to optimize the electrophysical parameters of grounding devices in conjunction with vertical composite grounding conductors. It has been found that fluctuations in soil resistivity caused by changes in weather and climatic conditions can lead to instability of the ground loop resistance. The study shown that without appropriate measures, the resistance of the loop as a result of seasonal changes in soil properties may exceed acceptable values. This is fraught with deviations in the resistance to current spreading of grounding devices beyond the limits of acceptable parameters. To compensate for these fluctuations, a method is proposed to reduce the seasonality factor. Reducing seasonality plays an important role in ensuring the safety of service personnel and farm animals by maintaining the resistance of the grounding device within the limits of regulatory values. The authors discuss methods for artificially reducing the resistance of the ground loop, including increasing its size and using deep ground electrodes. The results of vertical electrode probing of the soil at the sites of grounding conductors are presented, the effect of humidity on the resistivity of the soil is shown, the influence of soil layering and the presence of moisture-saturated soil layers is considered. A method is proposed that allows the mixture to be introduced together with a vertical composite grounding device, the design of the coupling, tip and auxiliary device, experimental studies of the proposed designs are carried out and the results of measuring the current spreading resistance of such a grounding device with both standard and proposed couplings are presented. A comparison was made with a grounding device without the use of mixtures. The measurement results demonstrate that with an increase in the length of the grounding device, its diameter and the volume of the injected mixture, the resistance decreases. It is shown that the proposed solution makes it possible to reduce seasonality by 1.64–2.1 times, depending on the couplings used, and to obtain a grounding conductor with an equivalent diameter dozens of times larger than the diameter of a composite grounding conductor. The authors propose the use of soil-replacing mixtures to reduce soil resistivity and ensure the stability of the grounding loop throughout the entire service life. The proposed method of applying mixtures without pre-drilling makes it possible to reduce the cost of constructing grounding devices.

**Keywords:** personnel safety, grounding resistance, standard values, soil resistivity, climatic conditions, seasonality factor, grounding electrodes, deep grounding devices, soil moisture, temperature changes, multilayered soil, groundwater, soil-substituting mixtures, hydrogel, graphite, clay, operational stability, cost reduction, well drilling, soil electrical conductivity, vertical electrode probing

**For citation:** Pavlovich I. A., Baraishuk S. M., Murodov M., Nabiev M. (2024) A Method of Applying Mixtures to Optimize Grounding during Installation of Vertical Composite Grounding Devices. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (6), 475–487. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-475-487> (in Russian)

## **Введение**

Для обеспечения безопасности обслуживающего персонала, а также сельскохозяйственных животных необходимо, чтобы сопротивление заземляющего устройства было в пределах нормы, установленной в действующей нормативно-правовой документации. Из-за изменений погодноклиматических условий происходят колебания удельного сопротивления грунта, что в свою очередь ведет к нестабильности значений сопротивления контура заземления. Эти колебания должны быть компенсированы использованием при расчете так называемого коэффициента сезонности  $K_c$ , который фактически показывает диапазон изменений сопротивления одного и того же контура заземления в зависимости от состояния грунта (влажность, температура, изменение уровня грунтовых вод и т. п.). Существует вероятность того, что сопротивление контура заземления на конкретном объекте в какой-то промежуток времени будет выше, чем допустимое расчетное значение, что может привести к необратимым последствиям, таким как поражение электрическим током людей и животных [1], а также возможному повреждению дорогостоящего оборудования [2, 3]. Чтобы этого избежать, приходится искусственно уменьшать сопротивление контура, увеличивая его размеры так, чтобы влияние изменения климатических режимов на сопротивление грунта непосредственно в околоэлектродном пространстве контура заземления не вызвало увеличения сопротивления выше нормируемых значений.

Удельное сопротивление грунта зависит от многих факторов, таких как содержание влаги в почве, тип почвы, плотность и количество слоев [4]. Из них необходимо выделить температуру и содержание влаги, так как они непосредственно зависят от климатических условий в данной местности. Из исследований, проведенных ранее, видно, что удельное сопротивление грунта на глубине 0,3 м при температуре от 0 до  $-10$  °C увеличивается в 10 раз, а на глубине 0,5 м – в 3 раза [5]. Для того чтобы снизить влияние температуры, обычно используются вертикальные глубинные заземлители длиной более 10 м. Похожим решением является использование электродов, опущенных в скважины на большую глубину и заполненных проводящим грунтом (коксовая мелочь, бетон и пр.). Глубинные заземления являются предпочтительными в тех случаях, когда грунт на значительной глубине обладает хорошей проводимостью, например, если они достигают водонапитанного слоя. Наиболее простое и распространенное решение – выполнить такой заземлитель в виде однородных длинных стержней, соединенных муфтами. Заглубление производится, применяя различные методы, такие как ввинчивание, забивка, бурение и т. д. Такое решение в целом обеспечивает более надежное заземление и улучшает защиту от перенапряжений и токов утечки.

В работе [6] рассматриваются вопросы о том, что, возрастание глубины в арифметической прогрессии приводит к уменьшению амплитуды температуры в геометрической прогрессии.

При проектировании заземляющего устройства часто не берут в расчет структуру грунта, считая, что он однослойный, а также не учитывают влияние подземных вод. В [5] авторами проведены измерения сопротивления заземлителя в зависимости от его длины. Авторы делают вывод о том, что с ростом длины сопротивление снижается.

Особенность строения почвы, в которой содержатся грунтовые воды, обусловлена ее пористостью, влагоемкостью и капиллярными свойствами. В работе [4] сказано, что «при изменении объема твердой части грунта меняется доля порового объема, заполненного водой, а сам объем грунта не меняется». Глубины залегания грунтовых вод различаются в зависимости от конкретного местоположения, типа грунта и других факторов. Это означает, что даже при использовании глубинных электродов для заземления не всегда возможно обеспечить одинаковый уровень влажности на всей протяженности электрода. Таким образом, при обустройстве заземляющего устройства необходимо учитывать особенности местности и грунта для обеспечения наилучшего контакта электрода с землей.

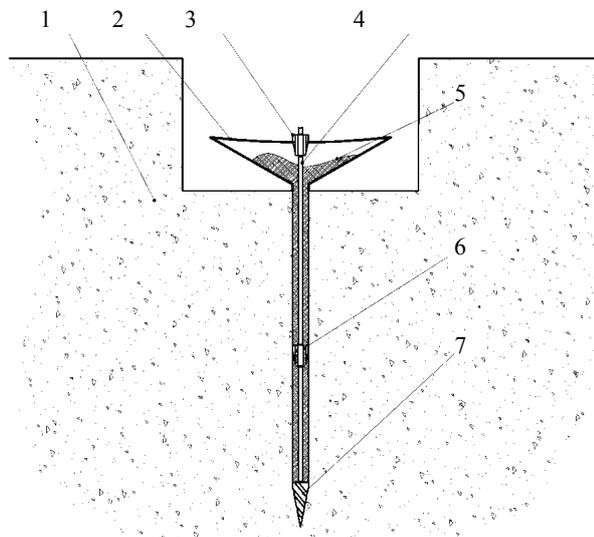
Как показано ранее [6–9], для того чтобы снизить удельное сопротивление грунта в месте залегания заземляющих электродов, можно использовать различные грунтозамещающие смеси, которые позволяют более надежно удерживать влагу в околоэлектродном пространстве при помощи гидрогеля, а также, имея в своем составе графит и глину, снизить общее сопротивление грунта.

Такие смеси совместно с глубинными одиночными заземлителями, как правило, применяются с предварительным бурением лунки под заземлитель и смесь [10, 11]. При таком способе получается распределить данную композиционную смесь по всей длине глубинного заземлителя, что позволит снизить общее сопротивление контура заземления и поддерживать его стабильное значение в течение всего срока эксплуатации. Однако это ведет к удорожанию работ по строительству. Для того чтобы снизить эти затраты, нами предложен способ внесения данных смесей без предварительного бурения лунки под электрод.

### **Экспериментальная часть**

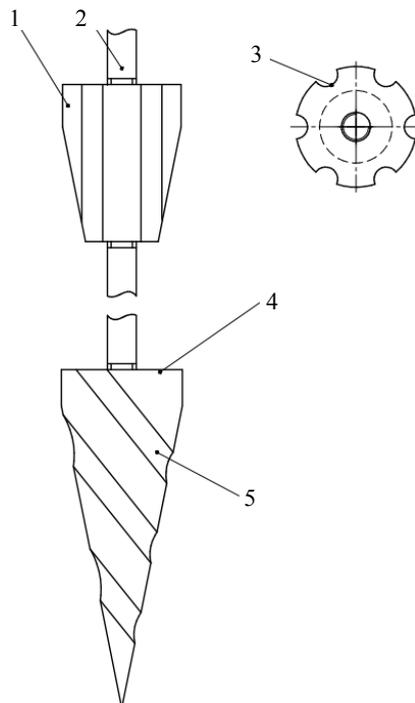
Для проведения эксперимента по определению возможности монтажа глубинных заземлителей без предварительного бурения нами разработаны наконечники и соединительная муфта, имеющие специальную форму и большой диаметр, для того чтобы равномерно распределить грунтозамещающую смесь во всем приэлектродном пространстве без использования бура.

Монтаж осуществляется следующим способом. В соответствии с рекомендациями [7] вынимается грунт до уровня минус 0,5–0,7 м, после чего устанавливается монтажная воронка узким концом к грунту, как показано на рис. 1. Собирается стартовый стержень глубинного заземлителя, на который устанавливается наконечник (рис. 2), аналогичный применяемым для систем горизонтального прокола грунта [12, 13].



*Рис. 1.* Способ монтажа глубинного заземлителя с использованием грунтозамещающей смеси: 1 – грунт; 2 – воронка; 3 – соединительная муфта; 4 – составной электрод; 5 – грунтозамещающая смесь; 6 – проточки на муфте; 7 – наконечник

*Fig. 1.* Method of installing a deep ground device using a soil-substituting mixture: 1 – soil; 2 – funnel; 3 – coupling; 4 – composite electrode; 5 – soil-substituting mixture; 6 – grooves on the coupling; 7 – tip



*Рис. 2.* Внешний вид наконечника и муфты: 1 – муфта; 2 – составной заземлитель; 3 – проточки на муфте; 4 – наконечник; 5 – проточки на наконечнике

*Fig. 2.* Appearance of the tip and coupling: 1 – coupling; 2 – composite ground device; 3 – grooves on the coupling; 4 – tip; 5 – grooves on the tip

Диаметр такого наконечника соответствует диаметру нижней части воронки. После этого воронка заполняется переувлажненной смесью [7, 8] и начинается монтаж электродов в грунт при помощи обратного молотка либо другого ударного инструмента. После погружения первого электрода в грунт устанавливается муфта, имеющая или продольные пазы, или отверстия, позволяющие продавить через них смесь, и сверху монтируется следующий электрод. При применении такой схемы несколько увеличивается механическое сопротивление грунта и требуемые усилия на забивку составного заземлителя, однако это позволяет сформировать вокруг тела заземлителя значительный объем смеси, которая имеет намного меньшее удельное электрическое сопротивление, чем основной грунт. Кроме того, смесь содержит гидрогели, которые в рабочем состоянии позволяют выравнивать влажность грунта вдоль тела электрода, обладая транспортными функциями для влаги [14]. При достижении таким заземлителем водонасыщенных слоев грунта влага адсорбируется гидрогелем и за счет транспортной функции распределяется вдоль тела электрода, а из-за наличия специальных проточек на муфте происходит перенос влаги и через муфту, что позволяет распределить ее вдоль всего тела заземлителя.

Перед монтажом глубинных заземлителей были проведены измерения удельного электрического сопротивления грунта в местах их установки, используя метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) (рис. 3). ВЭЗ представляет собой метод исследования строения и свойств грунтовых и горных пород путем определения электрической проводимости грунта в вертикальном направлении, позволяющий определить кажущееся сопротивление. Принцип ВЭЗ заключается во взаимодействии переменного электрического поля, создаваемого между электродами, с грунтом, который обладает разной электрической проводимостью в зависимости от своих физических и химических свойств [15]. Такой метод позволяет определить сопротивление не только в точке измерений, но и в некоторой воображаемой точке. Вблизи такой точки в грунт забивают два измерительных электрода (их называют приемными).

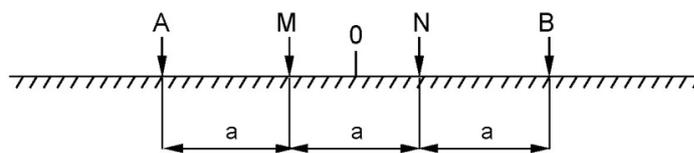


Рис. 3. Метод вертикального электрического зондирования

Fig. 3. Vertical electrical probing method

Для измерения разности потенциалов между двумя точками в грунте использовалась установка, состоящая из:

- измерителя сопротивления заземления BelMRU-1;
- двух измерительных электродов (M и N);
- двух питающих (A и B).

Электрический ток, протекающий через питающие электроды, претерпевает потери в породе из-за ее сопротивления, и эта величина влияет на потенциал, измеряемый между электродами М и N. После проведения исследований с использованием оборудования, отвечающего известным требованиям [16], проводится математическая интерпретация результатов, которая позволяет оценить наличие слоев с разными свойствами, структуру и электрическое сопротивление грунта на разных глубинах и соответственно определить оптимальную глубину заложения вертикального составного глубинного заземлителя. Кроме того, данный метод позволяет косвенно предположить глубину залегания и засоленность подземных вод [16]. Результаты проведения ВЭЗ представлены на рис. 4.

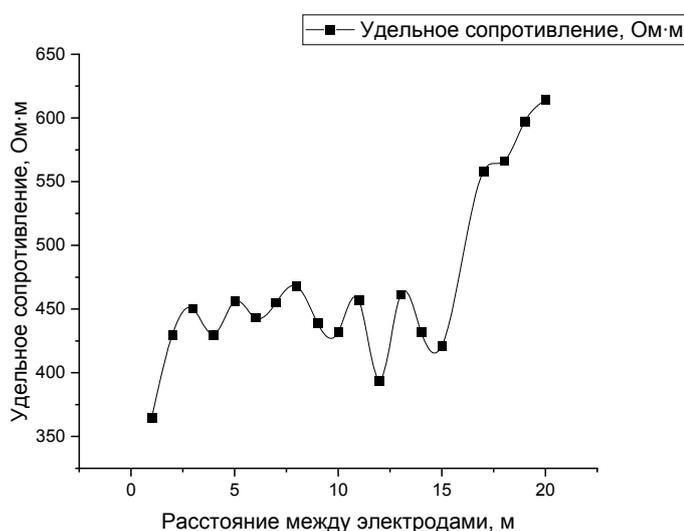


Рис. 4. Результаты вертикального электрического зондирования

Fig. 4. Results of vertical electrical probing

Из графика видно, что с увеличением расстояния между измерительными электродами, а следовательно, и глубины зондирования сопротивление повышается, что подтверждает разнородность почвы в местах монтажа. Полученные данные ВЭЗ позволяют предположить, что оптимальная длина глубинного заземлителя должна быть 11 м.

При проведении натурного эксперимента были смонтированы: контрольный глубинный заземлитель, изготовленный из стандартных составных стержневых заземлителей и муфт заводского исполнения, поставляемых в комплекте; аналогичный по конструкции заземлитель, при монтаже которого была использована смесь; экспериментальный заземлитель, при монтаже которого были использованы разработанные нами муфты и наконечник, представленные на рис. 2, и также использовалась смесь для оптимизации электрофизических параметров заземляющих устройств [8-10].

После монтажа данных контуров каждые несколько недель в течение года проводились измерения сопротивления. Графики представлены на рис. 5.

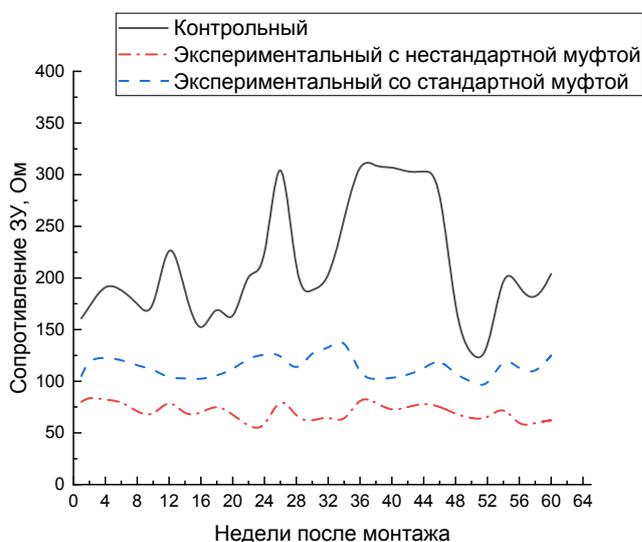


Рис. 5. Годовые изменения сопротивления контрольного, экспериментального с нестандартной муфтой и экспериментального со стандартной муфтой глубинного электродов

Fig. 5. Annual changes in the resistance of the control deep electrode, experimental deep electrode with a non-standard coupling, and experimental deep electrode with a standard coupling

### Интерпретация результатов

Из полученных зависимостей видно, что сопротивление экспериментальных заземляющих устройств значительно ниже, чем контрольного заземлителя. Причем для разработанных муфт это сопротивление заметно ниже, чем со стандартными муфтами, что обусловлено большим объемом смеси вокруг тела электрода. Кроме того, по графику видно, что для стандартных муфт сезонность снижается примерно в 1,64 раза, а для разработанных – в 2,1. Это можно объяснить намного лучшим распределением состава смеси вдоль всего заземлителя. Такое распределение вызывает не только снижение сопротивления, но и за счет капиллярного эффекта гидрогеля (транспортных функций) [18] поднимает влагу, подтягивая ее с глубины и распределяя по всей длине заземлителя.

Для подтверждения экспериментальных данных проведено математическое моделирование сопротивлений данных контуров с использованием методики, предложенной в [19].

Расчет сопротивления растеканию тока глубинного заземлителя проведен без учета смеси, с использованием рекомендованного в нормативной документации [20] коэффициента сезонности для Минской области. Согласно выражению, представленному в [17], получим

$$R_B = \frac{\varphi\rho}{2\pi l_B} \cdot \left( \ln \frac{2l_B}{d} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4t + l_B}{4t - l_B} \right) \text{ (Ом)}, \quad (1)$$

где  $t$  – глубина заложения вертикального электрода (считается расстояние от поверхности земли до середины электрода, м;  $l_B$  – длина вертикального глубинного заземлителя, м;  $d$  – диаметр заземлителя, мм;  $\rho$  – удельное

сопротивление грунта в месте монтажа, Ом·м;  $\varphi$  – коэффициент сезонности [19].

Согласно измерениям, удельное сопротивление грунта составляет 526 Ом·м, подставив в выражение величины получим

$$R_B = \frac{2,4 \cdot 526}{2\pi \cdot 11} \cdot \left( \ln \frac{2 \cdot 11}{0,012} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 6 + 11}{4 \cdot 6 - 11} \right) = 146,4 \text{ (Ом)}.$$

Это значение близко к реальной величине (156,4 Ом) сопротивления контура заземления, полученной экспериментальным путем.

Используя выражения из [19–21], произведем расчет сопротивления глубинного заземлителя при использовании грунтозамещающей смеси для оптимизации электрофизических параметров заземляющего устройства

$$R_B = \varphi \cdot \rho_{\text{экв}} \frac{1}{2\pi l_B} \left( \ln \frac{2l_B}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t + l_B}{4t - l_B} \right),$$

где  $\varphi$  – экспериментальный коэффициент сезонности для смеси;  $\rho_{\text{экв}}$  – удельное сопротивление грунта в месте заложения, рассчитанное по формуле, Ом·м,

$$\rho_{\text{экв}} = \rho_3 \cdot 0,98^{\frac{d_{\text{смеси}}}{d_3}} \cdot \left( \frac{\rho_{\text{смеси}}}{\rho_3} \right)^{\frac{1}{3\pi}}, \quad (3)$$

$\rho_3$  – удельное сопротивление земли (грунта), Ом·м;  $d_{\text{смеси}}$  – эквивалентный диаметр заземлителя и смеси, м;  $d_3$  – диаметр заземлителя, м;  $\rho_{\text{смеси}}$  – удельное сопротивление смеси, Ом·м,

$$\left( d_{\text{смеси}} = \sqrt{\frac{V_{\text{смеси}}}{l}} \right), \quad (4)$$

$V_{\text{смеси}}$  – объем вносимой смеси, м<sup>3</sup>;  $l$  – длина заземлителя (электрода),

$$d_{\text{смеси}} = \sqrt{\frac{0,02}{3}} + 0,012 = 0,082 + 0,012 = 0,094 \text{ м};$$

$$\rho_{\text{экв}} = 526 \cdot 0,98^{\frac{0,1}{0,012}} \cdot \left( \frac{50}{526} \right)^{\left( \frac{1}{3\pi} \right)} = 349,75 \text{ (Ом·м)};$$

$$R_B = 1,64 \cdot 349,75 \frac{1}{2\pi \cdot 11} \left( \ln \frac{2 \cdot 11}{0,012} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 6 + 11}{4 \cdot 6 - 11} \right) = 66,5 \text{ (Ом)}.$$

Полученное значение близко к экспериментальным данным, равным 70,7 Ом.

Методом обратного моделирования проведен расчет «мнимого» диаметра заземлителя при использовании грунтозамещающей смеси. Расчет показывает эффективность применения данной смеси совместно с заземлителем. Для этого из формулы (1) выразим значение  $d$

$$d = \frac{2l_B}{e^{\left( \frac{R_B - \frac{\rho}{2\pi b} \ln \frac{4t+b}{4t-b}}{\frac{\rho}{2\pi b}} \right)}}.$$

Подставим в это выражение значение  $R_B$ , полученное при расчете формулы (2):

– для стандартной муфты

$$d = 0,07 \text{ м};$$

– для предлагаемой муфты

$$d = 0,94 \text{ м}.$$

Проведенный обратный расчет мнимого диаметра заземлителя показал, что при использовании данной смеси совместно с глубинным заземлителем увеличился мнимый диаметр электрода. Для стандартных муфт он составляет 0,07 м, для внедряемой 0,94 м.

Такой результат показывает, что гидрогель позволяет аккумулировать влагу вокруг электрода и повышает эффективность применения смесей для оптимизации заземления, в состав которых он входит. Подтверждение данной теории можно найти в работах [18, 22, 23], где показано что, применение гидрогеля способно увеличивать в 1,5–2 раза равновесный запас доступной влаги в почве. Кроме того, полученные результаты указывают на возможность эффективного использования вертикальных составных электродов совместно со смесями, что позволяет значительно улучшить электрофизические параметры заземляющих устройств.

#### ВЫВОДЫ

1. Полученные результаты показывают перспективность использования смесей для оптимизации электрофизических параметров заземляющих устройств. Гидрогель, входящий в состав смеси, благодаря своим транспортным и капиллярным свойствам распределяет влагу из более глубоких слоев почвы и удерживает ее вокруг всего тела заземлителя.

2. Применение специальной муфты позволяет обеспечить переток влаги между отдельными сегментами заземлителя и добиться более низких значений сопротивления контура, чем при использовании стандартных муфт, а также еще больше снизить сезонные изменения сопротивления растеканию тока вертикальных составных заземлителей.

3. Полученные результаты расчетов свидетельствуют о том, что использование смеси на основе гидрогеля позволило в десятки раз увеличить мнимый диаметр электрода заземления, что положительно сказывается на сопротивлении заземляющего устройства и стабильности его свойств, а также делает предложенный способ перспективным для широкого применения при строительстве систем заземления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Способ снижения сезонных изменений сопротивления заземляющих устройств / С. М. Барайшук [и др.] // Агропанорама. 2023. № 6 (160). С. 19–25.

2. Глушко, В.И. Определение уровня перенапряжений во вторичных цепях подстанций при распространении по высоковольтным шинам грозового импульса напряжения / В. И. Глушко, Е. А. Дерюгина // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 3. С. 211–227. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-3-211-227>.
3. Струцкий, Н. В. Организация электрохимической защиты стальных подземных трубопроводов от коррозии в газораспределительной отрасли Республики Беларусь / Н. В. Струцкий, В. Н. Романюк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 67, № 3. С. 257–267. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-257-267>.
4. Веденева, Л. М. Исследование влияния основных свойств грунта на сопротивление заземляющих устройств / Л. М. Веденева, А. В. Чудинов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2017. Т. 16, № 1. С. 89–100.
5. Зайцева, Н. М. Определение температуры грунта на глубине заземлителей / Н. М. Зайцева, Б. Б. Исабекова, М. Я. Клецель // Электричество. 2011. № 7. С. 19–24.
6. Барайшук, С. М. Снижение сопротивления заземляющих устройств применением обработки грунта неагрессивными к материалу заземлителя стабилизирующими влажностью добавками / С. М. Барайшук [и др.] // Агропанорама. 2021. № 5 (147). С. 28–33.
7. Драко, М. А. О разработке смеси на основе гидролизованного полиакрилонитрила для уменьшения удельного электрического сопротивления грунта / М. А. Драко, С. М. Барайшук, И. А. Павлович // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 1. С. 80–92. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-80-92>.
8. Павлович, И. А. Снижение электрического сопротивления заземляющих устройств применением грунтозамещающей смеси на основе графита и гидрогеля для стабилизации электрофизических параметров грунта / И. А. Павлович, С. М. Барайшук // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 4. С. 322–332. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-322-332>.
9. Drako, M. (2020) Tendencies in the Design of the Grounding Devices for the Electrical Installations of the Belarusian Energy System / M. Drako, S. Baraishuk // Rudenko International Conference “Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems” (RSES 2020). E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 2016. Art. 01067. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601067>.
10. Смесь для снижения переходного сопротивления электрод – грунт: пат. BY 24181 / С. М. Барайшук, И. А. Павлович. Опубл. 28.02.2024.
11. Заземляющие устройства. Системы уравнивания потенциалов. Заземлители. Заземляющие проводники. Технические требования: ГОСТ Р 58882–2020. Введ. 16.06.2020. М.: Стандартинформ, 2020. 45 с.
12. Нескоромных, В. В. Анализ сопротивлений и разработка технических средств для бурения в горизонтальном стволе скважины / В. В. Нескоромных, Б. Лиу, П. Г. Петенев // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2020. № 3 (327). С. 10–14.
13. Kuriachii, A. E. Applying modern technologies when drilling directional wells with long horizontal boreholes / A. E. Kuriachii, S. M. Kaliagin // Изв. высш. учеб. заведений. Горный журнал. 2020. № 5. С. 13–18. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-5-13-18>.
14. Ширинов, Ш. Д. Исследование кинетики набухания синтезированных гидрогелей на основе гидролизованного полиакрилонитрила [Электронный ресурс] / Ш. Д. Ширинов, А. Т. Джалилов // Universum: химия и биология. 2018. № 3 (45). Режим доступа: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/5601>.
15. Федорова, О. И. Математическое моделирование электрических зондирований над вертикальным пластом с комбинированной и симметричной установками / О. И. Федорова // Уральский геофизический вестник. 2020. № 3 (41). С. 37–43. <https://doi.org/10.25698/ugv.2020.3.5.37>.
16. Руденко, С. С. Требования к приборам для проведения вертикального электрического зондирования грунта при диагностике состояния заземляющих устройств / С. С. Руденко // Электротехника і Електромеханіка. 2016. № 5. С. 68–73. <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2016.5.12>.
17. Результаты электрометрии при поиске участков засоления подземных вод в зоне активного водообмена / Ю. И. Степанов [и др.] // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2019. № 2 (39). С. 284–292.

18. Капиллярные эффекты в полидисперсных системах и их использование в почвенном конструировании / А. В. Смагин [и др.] // Почвоведение. 2021. Т. 55, № 9. С. 1150–1164. <https://doi.org/10.31857/s0032180x21090100>.
  19. Павлович, И. А. Методики расчета сопротивления заземляющего устройства, выполненного с применением грунтозамещающей смеси, для оптимизации электрофизических параметров грунта / И. А. Павлович, С. М. Барайшук, В. В. Богданович // Вестник Фонда фундаментальных исследований. 2023. № 4 (106). С. 146–157.
  20. Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемо-сдаточных испытаний: ТКП 339–2022 (33240). Минск: Министерство энергетики Республики Беларусь, 2011. 593 с.
  21. Молниезащита зданий, сооружений и инженерных коммуникаций: СН 4.04.03–2020. Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2020. 161 с.
  22. Агафонов, О. М. Возможности полимерного гидрогеля как накопителя почвенной влаги в зоне неустойчивого увлажнения Краснодарского края / О. М. Агафонов, В. Ю. Ревенко // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2017. № 10. С. 35–38.
  23. Годунова, Е. И. Эффективность гидрогеля на четвертый год после внесения в условиях Центрального Предкавказья / Е. И. Годунова, В. Н. Гундырин, С. Н. Шкабарда // Достижения науки и техники АПК. 2017. Т. 31, № 5. С. 16–19.
- Поступила 12.07.2024 Подписана в печать 12.09.2024 Опубликована онлайн 29.11.2024

#### REFERENCES

1. Baraishuk S. M., Pavlovich I. A., Murodov M. Kh., Bogdanovich V. V. (2023) Method for Reducing Seasonal Changes in Resistance of Grounding Devices. *Agropanorama*, (6), 19–25. <https://doi.org/10.56619/2078-7138-2023-160-6> (in Russian).
2. Glushko V. I., Deryugina E. A. (2017) Determination of the Level of Overvoltage in the Secondary Circuits of Substations when Lightning Impulse Voltage is Distributed in High-Voltage Buses. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (3), 211–227. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-3-211-227> (in Russian).
3. Strutsky N. V., Romaniuk V. N. (2024) Organization of Electrochemical Protection of Steel Underground Pipelines Against Corrosion in the Gas Distribution Industry 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*, 67 (3), 257–267. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-257-267> (in Russian).
4. Vedeneeva L. M., Chudinov A. V. (2017) Investigation of the Influence of the Basic Properties of Soil on the Resistance of Grounding Devices. *Vestnik Permskogo Natsional'nogo Issledovatel'skogo Politekhnikeskogo Universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i Gornoe Delo = Bulletin of PNRPU. Geology. Oil and Gas Engineering and Mining*, 16 (1), 89–100 (in Russian).
5. Zaitseva N. M., Isabekova B. B., Kletsel' M. Ya. (2011) Determination of the Ground Temperature at the Depth of the Grounding Conductors Determination of the ground temperature at the depth of the grounding conductors. *Elektrichrstvo*, (7), 19–24 (in Russian).
6. Baraishuk S. M., Pavlovich I. A., Murodov M. H., Abdullaev H., Skripko A. N. (2021) Reducing the Resistance of Grounding Devices by Using Soil Treatment with Moisture-Stabilizing Additives that Are Not Aggressive to the Grounding Material. *Agropanorama*, (5), 28–33 (in Russian).
7. Drako M. A., Baraishuk S. M., Pavlovich I. A. (2021) Compound Mixtures Based on Hydrolyzed Polyacrylonitrile Reducing Soil Electrical Resistivity. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Problemy Energetiki = Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 23 (1), 80–92. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-80-92> (in Russian).
8. Pavlovich I. A., Baraishuk S. M. (2023) Reduction of the Electrical Resistance of Grounding Devices by the Use of a Soil Replacement Mixture Based on Graphite and Hydrogel to Stabilize the Electrophysical Parameters of the Soil. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh*

- Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (4), 322–332. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-322-332> (in Russian).
9. Drako M., Baraishuk S. (2020) Tendencies in the Design of the Grounding Devices for the Electrical Installations of the Belarusian Energy System. *E3S Web of Conferences*, 216, 01067. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601067>.
  10. Baraishuk S. M., Pavlovich I. A. (2024) *A Mixture to Reduce the Electrode-Ground Transient Resistance*. Patent BY no. 24181 (in Russian).
  11. State Standart R 58882–2020. *Grounding Devices. Equation Potentials Systems. Grounders. Grounding Conductors. Technical Requirements*. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 45 (in Russian).
  12. Neskoromnyh V. V., Baochang L., Petenev P. G. (2020) Resistance Analysis and Development of Technical Tools for Drilling in a Horizontal Wellbore. *Stroitel'stvo Neftnykh i Gazovykh Skvazhin na Sushe i na More* [Construction of Oil and Gas Wells on Land and Sea], (3), 10–14 (in Russian).
  13. Kuriachii A. E., Kaliagin S. M. (2020) Applying Modern Technologies when Drilling Directional Wells with Long Horizontal Boreholes. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*, (5), 13–18. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-5-13-18>.
  14. Sgirinov Sh, Jalilov A. (2018) Research of Swelling Kinetics of Synthesized Hydrogels Based on the Hydrolyzed Polyacrylonitrile. *Universum: Khimiya i Biologiya* [Chemistry and Biology], (3). Available at: <http://7universum.com/ru/nature/archive/item/5601> (in Russian).
  15. Fedorova O. I. (2020) Mathematical Modeling of Electric Soundings above a Vertical Layer with the Combined and the Symmetrical Arrays. *Ural'skii Geofizicheskii Vestnik*, (3), 37–43. <https://doi.org/10.25698/ugv.2020.3.5.37> (in Russian).
  16. Rudenko S. S. (2016) Requirements for Devices for Vertical Electrical Sounding of Soil at Diagnostics of Grounding Devices. *Elektrotehnika i Elektromekhanika = Electrical and Electronic Engineering*, (5), 68–73 (in Russian).
  17. Stepanov Y. I., Kostarev S. M., Gorozhancev A. V., Taynitsky A. A. (2019) Electrometry Results for Searching of Salting Zones of the Underground Water in the Area of Active Water Exchange. *Geologiya i Poleznye Iskopaemye Zapadnogo Urala* [Geology and Minerals of the Western Urals], (2), 284–292 (in Russian).
  18. Smagin A. V., Sadovnikova N. B., Belyaeva E. A., Kirichenko A. V., Krivtsova V. N. (2021) Capillary Effects in Polydisperse Systems and Their Use in Soil Engineering. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*, 55 (10), 1433–1446. <https://doi.org/10.31857/s0032180x21090100>.
  19. Pavlovich I. A., Baraishuk S. M., Bogdanovich V. V. (2023) Methods for Calculating the resistance of a Grounding Device Made Using a Soil Replacement Mixture to Optimize the Electrophysical Parameters of the Soil. *Vestnik Fonda Fundamental'nykh Issledovaniy = Bulletin of the Foundation for Fundamental Research*, (4), 146–157 (in Russian).
  20. TKP 339–2011(02230). *Electrical Installations for Voltage up to 750 kV. Power Transmission Lines, Overhead and Current Lines, Distribution and Transformer Substations, Electric Power and Battery Installations, Electrical Installations of Residential and Public Buildings. Rules and Protective Measures of Electrical Safety. Electricity Accounting. Norms of Acceptance Tests*. Minsk, Ministry of Energy of the Republic of Belarus, 2011. 593 (in Russian).
  21. SN 4.04.03–2020. *Lightning Protection of Buildings, Structures and Utilities*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2020. 161 (in Russian).
  22. Agafonov O. M., Revenko V. Yu. (2017) The Possibilities of Polymer Hydrogel as a Storage of Soil Moisture in the Zone of Unstable Humidification of the Krasnodar Krai [Territory]. *Mezhdunarodnyi Zhurnal Gumanitarnykh i Estestvennykh Nauk = International Journal of Humanities and Natural Sciences*, (10), 35–38 (in Russian).
  23. Godunova E. I., Gundyryn V. N., Shkabarda S. N. (2017) Efficiency of Hydrogel for the Fourth Year after Introduction under Conditions of the Central Pre-Caucasus. *Dostizheniya Nauki i Tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of AICis*, 31 (5), 16–19 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-488-500>

УДК 621.315.2

## Выбор конструктивного устройства кабельных линий напряжением 10 кВ по критерию минимума приведенных затрат

М. Э. Высоцкий<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

**Реферат.** В статье рассматривается вопрос выбора оптимальной конструкции кабельных линий напряжением 10 (20, 35) кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Анализируются варианты использования трех- или одножильных кабелей, прокладываемых треугольником или в плоскости. Методологической основой работы служит принцип минимизации приведенных затрат, учитывающий как капиталовложения, так и ежегодные издержки, включая потери электроэнергии в кабелях. В рамках исследования построена номограмма экономических интервалов, позволяющая определять оптимальные сечения жил кабелей и граничные условия применения трех- и одножильных кабелей в зависимости от расчетной токовой нагрузки. Показано, что при существующей номенклатуре трехжильных кабелей с максимальным сечением жилы до 630 мм<sup>2</sup> одножильные кабели могут быть экономически целесообразны только при сечении жил 800 мм<sup>2</sup> и выше. Установлено, что приведенные затраты на прокладку одножильных кабелей в плоскости при двухстороннем заземлении экранов всегда оказываются больше, чем при прокладке треугольником. Этот эффект обусловлен увеличением как капитальных затрат, так и потерь электроэнергии в экранах кабелей. Для повышения экономичности кабельных линий в работе предлагается расширить номенклатуру трехжильных кабелей, включив в нее кабели с максимально возможным сечением жилы. Это позволит увеличить диапазон токовых нагрузок, в котором применение трехжильных кабелей будет экономически оправданным. Представленные в статье результаты могут использоваться при проектировании новых кабельных линий, анализе эффективности существующих, а также при модернизации и реконструкции городских кабельных сетей среднего напряжения.

**Ключевые слова:** способ прокладки, траншея, трехжильные кабели, одножильные кабели, номограмма, метод экономических интервалов

**Для цитирования:** Высоцкий, М. Э. Выбор конструктивного устройства кабельных линий напряжением 10 кВ по критерию минимума приведенных затрат / М. Э. Высоцкий // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 6. С. 488–500. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-488-500>

---

### Адрес для переписки

Высоцкий Максим Эдуардович  
Белорусский национальный  
технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 33 661-76-75  
[elsyst@bntu.by](mailto:elsyst@bntu.by)

### Address for correspondence

Vysotski Maksim E.  
Belarusian National  
Technical University  
65/2, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 33 661-76-75  
[elsyst@bntu.by](mailto:elsyst@bntu.by)

---

## The Choice of a Construction Arrangement for Cable Lines with a Voltage of 10 kV According to the Criterion of the Minimum Expected Cost

M. E. Vysotski<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarussian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The article considers the issue of choosing the optimal construction arrangement of cable lines with a voltage of 10 (20, 35) kV with cross-linked polyethylene insulation. The options for using three- or single-core cables laid in a triangle or in a plane are analyzed. The methodological basis of the work is the principle of minimizing the expected costs, taking into account both capital investments and annual costs, including losses of electrical energy in cables. Within the framework of the study, a nomogram of economic intervals was scheduled, which makes it possible to determine the optimal cable core sections and boundary conditions for the use of three- and single-core cables, depending on the calculated current load. It is shown that with the existing nomenclature of three-core cables with a maximum core cross-section up to 630 mm<sup>2</sup>, single-core cables can be economically feasible only with a core cross-section of 800 mm<sup>2</sup> and above. It has been discovered that the expected costs for laying single-core cables in the plane with two-way grounding of screens always turn out to be higher than when laying a triangle. This effect is due to an increase in both capital costs and power losses in cable screens. To increase the efficiency of cable lines, it is proposed to expand the range of three-core cables by including cables with the maximum possible core cross-section. This will make possible to increase the range of current loads in which the use of three-core cables will be economically justifiable. The results presented in the article can be used in the design of new cable lines, the analysis of the effectiveness of existing ones, as well as in the modernization and reconstruction of urban medium-voltage cable networks.

**Keywords:** method of laying, trench, three-core cables, single-core cables, nomogram, method of economic intervals

**For citation:** Vysotski M. E. (2024) The Choice of a Construction Arrangement for Cable Lines with a Voltage of 10 kV According to the Criterion of the Minimum Expected Cost. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (6), 488–500. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-488-500> (in Russian)

### Введение

При проектировании кабельных линий напряжением 10 (20, 35) кВ возникает вопрос выбора оптимальной конструкции: трех- или одножильные кабели, прокладываемые треугольником или в плоскости? Различные конструкции будут отличаться техническими и экономическими характеристиками.

Анализ литературных источников показывает, что единого подхода к выбору оптимальной конструкции кабельных линий не существует. Ряд работ [1, 2] посвящен сравнительному анализу одно- и трехжильных кабелей с точки зрения монтажа, пропускной способности, повреждаемости и электробезопасности. Другие исследования [3–8] посвящены оптимизации способа прокладки одножильных кабелей с целью минимизации затрат и повышения пропускной способности. В [9] производится сравнительная оценка кабельных линий из одно- и трехжильных кабелей с воздушными

линиями на основании приведенных затрат с учетом капиталовложений, эксплуатационных расходов, ущерба окружающей среде и ущерба от недопуска электроэнергии. В [10] дается приближенная оценка капиталовложений для трех- и одножильных кабелей с учетом стоимости кабеля и соединительных и концевых муфт. Важно отметить, что подход, игнорирующий эксплуатационные расходы, может приводить к некорректным техническим решениям.

Вопросы заземления экранов рассматриваются в работах [11–15]. При двухстороннем заземлении экранов в трехжильных кабелях при соприкасающихся экранах отсутствуют циркулирующие индуцированные токи в отличие от одножильных кабелей. Двухстороннее заземление экранов представляется наиболее электробезопасным и практичным, а одностороннее заземление может применяться только для кабельных линий малой длины. При прокладке одножильных кабелей в плоскости с двухсторонним заземлением экранов возникают значительные индуцированные токи, превышающие токи при прокладке треугольником, что создает существенные дополнительные затраты [13].

Таким образом, несмотря на существующий объем исследований, остается необходимость в комплексном подходе к выбору экономически обоснованной конструкции кабельной линии 10 кВ, учитывающем как капитальные, так и эксплуатационные затраты. В связи с отсутствием обоснованных рекомендаций представляется целесообразным определить критерии выбора и оценить граничные условия различных конструкций кабелей. Методологической основой работы служит принцип минимизации приведенных затрат: сечения жил кабелей должны выбираться, прежде всего, по экономическим соображениям [16]. Экономичным решением считается то, которое соответствует минимуму приведенных затрат, включающих капиталовложения и эксплуатационные расходы.

Цель данной работы заключается в определении критериев для выбора и граничных условий применения трех- и одножильных кабелей, прокладываемых треугольником и в плоскости с точки зрения экономичности.

### **Приведенные затраты на сооружение кабельной линии электропередачи**

Сооружение кабельной линии с одно- и трехжильными кабелями связано с различными капитальными затратами и ежегодными издержками. Согласно методу экономических интервалов [17], для кабельных линий разных напряжений и исполнения определяются приведенные затраты в зависимости от тока для различных сечений на единицу длины без учета ущерба согласно выражению

$$Z = (E + p_a)K + 3I^2 R \tau \beta \cdot 10^{-3},$$

где  $K$  – стоимость линии, руб./км;  $E$  – нижняя граница эффективности капиталовложений, принимаемая не ниже ставки за предоставление кредита или за хранение средств в банке [18];  $p_a$  – коэффициент отчислений

на амортизацию,  $p_a = \frac{K - K_{л}}{K \cdot T_c}$ ;  $K_{л}$  – ликвидационная стоимость линии, руб./км;  $T_c$  – срок службы кабеля, для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена  $T_c = 30$  лет, принимая  $K_{л} = 0$ ,  $p_a = 0,033$ ;  $I$  – наибольшая сила тока в жиле (расчетный ток линии), А;  $R = R'(1 + y_s + y_p)(1 + \lambda_1 + \lambda_2)$  – эквивалентное электрическое сопротивление кабеля (при средней температуре жилы во время эксплуатации кабеля  $\frac{\theta - \theta_a}{3} + \theta_a = \frac{90 - 15}{3} + 15 = 40$  °С) [19], Ом/км;  $\theta$  – максимальная расчетная температура жилы, °С;  $\theta_a$  – температура окружающей среды, °С;  $\tau$  – эквивалентное время максимальных потерь (например, для осветительно-бытовой нагрузки городов 2500 ч в год [20]);  $\beta$  – тариф на электроэнергию в электрической сети (средневзвешенный тариф), руб./(кВт·ч).

При выборе площади сечения проводов величину ежегодных издержек в виде расходов на эксплуатацию следует принимать постоянной, так как они практически не зависят от площади поперечного сечения [18]. При использовании метода экономических интервалов постоянная часть затрат не влияет на экономические интервалы. Следовательно, величиной эксплуатационных расходов можно пренебречь без искажения точности результатов.

Капитальные затраты на сооружение кабельных линий состоят из капитальных затрат на приобретение кабеля и линейной арматуры (соединительных и концевых муфт) и затрат на прокладку (рытье земляных траншей, засыпку их дна сеяным песком, укладку кабеля на песчаную подушку, засыпку кабеля сеяным песком и грунтом, восстановление, если требуется, твердого покрытия улиц и тротуаров), монтаж соединительных и концевых муфт [21, 22]. Ввиду отсутствия в справочной литературе укрупненных показателей стоимости кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена для номинального ряда сечений, оценим затраты на капиталовложения для трех- и одножильных кабелей на основе цен на кабели и муфты и единых расценок на строительные-монтажные работы.

Капиталовложения на сооружение кабельной линии представим в виде

$$K = C_k + C_n,$$

где  $C_k$  – стоимость кабеля и муфт, руб./км;  $C_n$  – то же прокладки кабеля, руб./км.

Примем цены из [23] для кабелей марки АПвП с минимально возможными сечениями экранов, что характерно для резистивного заземления нейтрали. Кабели с сечением жилы  $S = 50-120$  мм<sup>2</sup> имеют медный экран с площадью поперечного сечения 16 мм<sup>2</sup>, с сечением жилы 150–300 – с площадью 25 мм<sup>2</sup> и с сечениями 400–1000 – с площадью 35 мм<sup>2</sup>.

Поскольку в [23] отсутствуют цены на трехжильные кабели сечением выше  $400 \text{ мм}^2$ , представим зависимость стоимости кабелей от сечения жилы в виде линейной функции и рассчитаем значения для сечений жил  $500$  и  $630 \text{ мм}^2$ , как это делалось в [4, 5]. Цены на соединительные и концевые муфты примем из [10].

На рис. 1 показан поперечный разрез типовых траншей для прокладки одно- и трехжильных одноцепных кабельных линий [24]. В табл. 1 представлены характеристики различных траншей. Ширина дна траншеи  $b$  выбирается в зависимости от ширины ковша экскаватора таким образом, чтобы от края кабеля до боковой стороны траншеи оставалось не менее  $100 \text{ мм}$ .

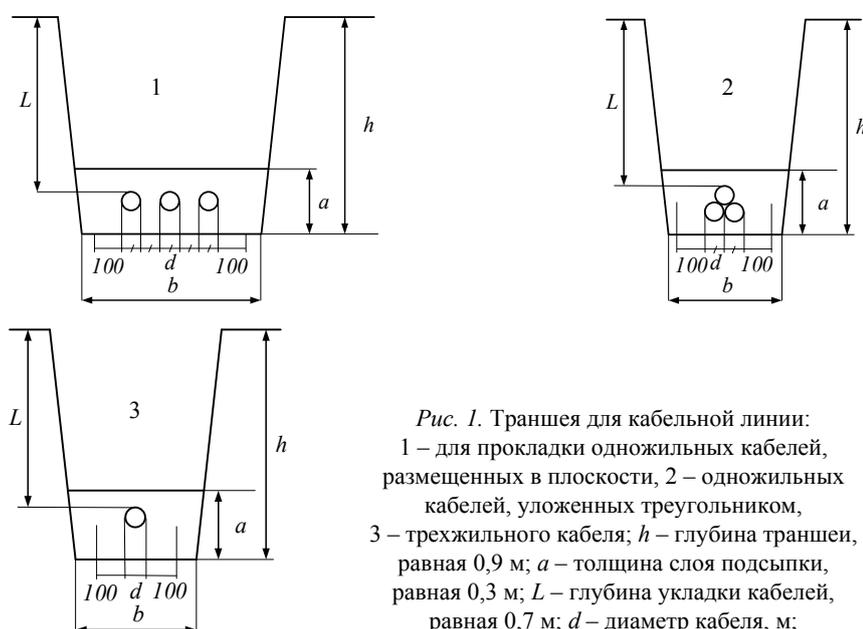


Рис. 1. Траншея для кабельной линии:  
1 – для прокладки одножильных кабелей, размещенных в плоскости, 2 – одножильных кабелей, уложенных треугольником, 3 – трехжильного кабеля;  $h$  – глубина траншеи, равная  $0,9 \text{ м}$ ;  $a$  – толщина слоя подсыпки, равная  $0,3 \text{ м}$ ;  $L$  – глубина укладки кабелей, равная  $0,7 \text{ м}$ ;  $d$  – диаметр кабеля,  $\text{м}$ ;  $b$  – ширина дна траншеи,  $\text{м}$

Fig. 1. Cable line trench: 1 – for laying single-core cables, laid in a plane, 2 – single-core cables laid in a triangle, 3 – three-core cable;  $h$  – the trench depth equal to  $0.9 \text{ m}$ ;  $a$  – bedding layer thickness equal to  $0.3 \text{ m}$ ;  $L$  – cable laying depth equal to  $0.7 \text{ m}$ ;  $d$  – cable diameter,  $\text{m}$ ;  $b$  – the width of the trench bottom,  $\text{m}$

Таблица 1

## Габариты земляных траншей и объемы земляных работ

## Dimensions of earth trenches and volumes of earthworks

Тип траншеи	$b$ , м	Объем земляных работ на 1 км траншеи, $\text{м}^3$		Объем песка или обогащенной песчано-гравийной смеси I группы на 1 км траншеи, $\text{м}^3$
		Рытье траншеи	Обратная засыпка	
T1	0,2	180	120	60
T2	0,3	270	180	90
T3	0,4	360	240	120
T4	0,5	450	300	150

Заметим, что земляные работы состоят из грунта, который будет вырыт в отвал и засыпан обратно, и грунта, который будет вырыт и вывезен, а на месте его окажется подсыпка.

Стоимость сооружения 1 км кабельной линии в траншее на основании норм расходов ресурсов [25] можно записать в виде составляющих

$$C_{\text{уст}} = (h-a)blC_1 + ablC_2 + C_3 + C_4 + ablC_5 + (h-a)blC_6 + ablC_7 + C_8,$$

где  $l$  – длина траншеи (принятая 1 км), м;  $C_1$  – стоимость разработки грунта в отвал экскаваторами, руб./м<sup>3</sup>;  $C_2$  – то же разработки грунта с погрузкой на автомобили-самосвалы экскаваторами, руб./м<sup>3</sup>;  $C_3$  – то же устройство постели для кабеля в траншее, руб./км;  $C_4$  – то же укладки кабеля в готовую траншею с массой кабеля на 1 м до 1, 3, 6 кг, руб./км;  $C_5$  – то же материала подсыпки, руб./м<sup>3</sup>;  $C_6$  – то же засыпки траншеи бульдозерами и работы на отвале, руб./м<sup>3</sup>;  $C_7$  – то же вывоза грунта на полигон, руб./м<sup>3</sup>;  $C_8$  – то же монтажа термоусаживаемых муфт кабелей напряжением 10 кВ, руб./шт.

Для расчета капиталовложений в кабельные линии разных сечений и конструкций примем следующие условия: траншея сооружается в грунте второй группы без асфальтобетонного покрытия по трассе кабельной линии. На основе этих исходных данных проведем расчеты и получим численные значения капиталовложений для различных вариантов кабельных линий. Результаты расчетов представлены в графическом виде на рис. 2.

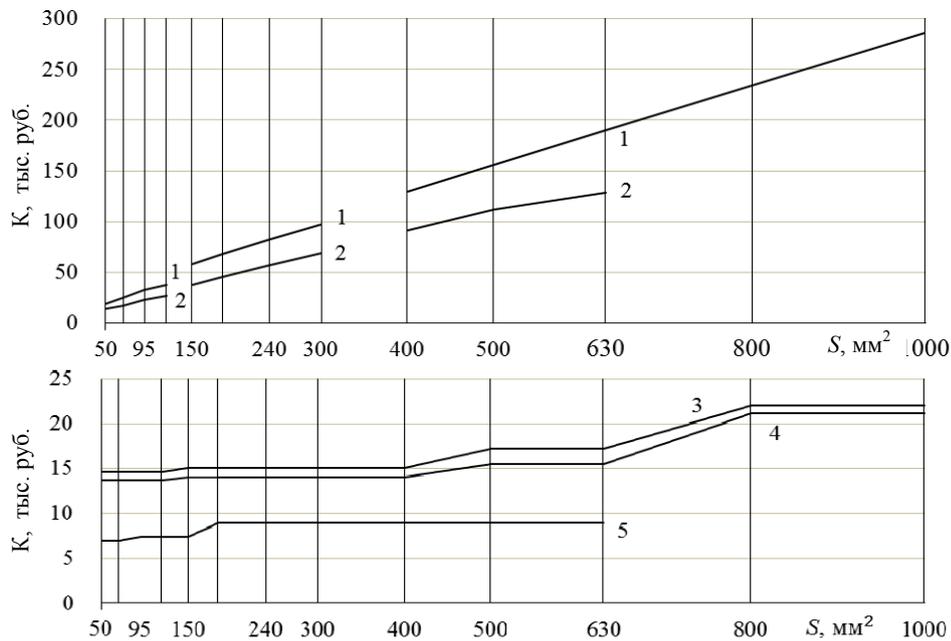


Рис. 2. Стоимость: 1 – трех одножильных кабелей; 2 – трехжильного кабеля; 3 – прокладки одножильных кабелей плоскости; 4 – то же одножильных кабелей треугольником; 5 – то же трехжильных кабелей

Fig. 2. The cost of: 1 – three single-core cables; 2 – a three-core cable; 3 – laying single-core cables in a plane; 4 – the same for single-core cables in a triangle; 5 – the same for three-core cables

Стоимость прокладки кабелей в траншее зависит от диаметра и погонной массы кабелей. Из рис. 2 видно, что прокладка одножильных кабелей в плоскости всегда оказывается дороже, чем прокладка треугольником, из-за большей ширины траншеи и соответственно больших объемов земляных работ. Стоимость прокладки составила около 34 % от общих капиталовложений для трехжильных кабелей сечением 50 мм<sup>2</sup> и около 41 % для одножильных кабелей того же сечения. Для кабелей с сечением жилы 630 мм<sup>2</sup> стоимость прокладки снизилась до 7 % от общих капиталовложений для трехжильных кабелей и до 8 % для одножильных кабелей.

### Номограмма для выбора сечения и конструкции кабеля

Для трехфазной кабельной линии наибольшее значение силы тока, при котором целесообразно переходить от площади сечения  $F_i$  к последующему из номинального ряда сечению  $F_{i+1}$ , можно определить по формуле [17, 20, 26]

$$I_{i+1} = \sqrt{\frac{(E + p_a)(K_{i+1} - K_i)}{3\tau\beta \cdot 10^{-3}(R_i - R_{i+1})}}$$

где  $K_i$  и  $K_{i+1}$  – капиталовложения в кабельные линии сравниваемых сечений;  $R_i$  и  $R_{i+1}$  – сопротивление линий сравниваемых сечений.

Экономический ток пропорционален величине  $\sqrt{\sigma} = \sqrt{\frac{E + p_a}{3\tau\beta \cdot 10^{-3}}}$ , введенной, чтобы избежать погрешностей и ошибок, связанных с осреднением значений экономической плотности тока, позволяющий представить ее линейной функцией [17, 27]. Величину  $\sqrt{\sigma}$  расположим в пределах:

$$\sqrt{\sigma_{\max}} = \sqrt{\frac{0,2 + 0,033}{3 \cdot 500 \cdot 0,24 \cdot 10^{-3}}} = 0,8 \left( \frac{\text{кВт}}{\text{руб.}} \right)^{1/2};$$

$$\sqrt{\sigma_{\min}} = \sqrt{\frac{0,07 + 0,033}{3 \cdot 8700 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3}}} = 0,1 \left( \frac{\text{кВт}}{\text{руб.}} \right)^{1/2}.$$

Номограмма экономических интервалов представляет собой график зависимости  $\sqrt{\sigma}$  от  $I$  при минимуме приведенных затрат. Для построения номограммы необходимо для каждого сечения жилы найти граничные токи  $I_{i+1}$  при  $\sqrt{\sigma_{\max}}$  и  $\sqrt{\sigma_{\min}}$ . Далее строится прямая линия между этими точками. Если значения  $I_{i+1}$  оказываются ниже длительно допустимого тока кабеля, то линия строится только до этого значения, а далее строится горизонтальная линия оси значений  $\sqrt{\sigma}$ .

Минимум приведенных затрат для различных расчетных токов при номенклатуре трехжильных кабелей до 630 мм<sup>2</sup> оказывается выше после некоторого значения тока, чем минимум приведенных затрат для одножильных кабелей, прокладываемые треугольником. Значение экономического тока  $I_{гр}$  в месте пересечения кривых минимума затрат для одножильных кабелей, прокладываемых треугольником, и трехжильных кабелей может быть определено по выражению

$$Z_{зж.мин} = Z_{тр.мин},$$

где  $Z_{зж.мин}$  и  $Z_{тр.мин}$  – приведенные затраты для трех- и одножильных кабелей при обеспечении минимума затрат.

Запишем:

$$\begin{cases} Z_{зж.мин} = (E + p_a)K_{зж.мин} + 3I^2 R_{зж.мин} \tau \beta \cdot 10^{-3}; \\ Z_{тр.мин} = (E + p_a)K_{тр.мин} + 3I^2 R_{тр.мин} \tau \beta \cdot 10^{-3}, \end{cases}$$

где  $K_{зж.мин}$  и  $K_{тр.мин}$ ;  $R_{тр.мин}$  и  $R_{зж.мин}$  – значения капиталовложений и сопротивлений для трех- и одножильных кабельных линий, при которых обеспечивается минимум приведенных затрат.

Значение  $I_{гр}$  может быть определено с помощью Excel. Для этого нужно рассчитать значения затрат при различных величинах расчетного тока  $\sqrt{\sigma_{макс}}$  и  $\sqrt{\sigma_{мин}}$ . С помощью функции «поиск решения» можно найти значение тока, при котором выполняется равенство  $Z_{зж.мин} = Z_{тр.мин}$ . На рис. 3 представлена номограмма экономических интервалов выбора оптимальных сечений жил для трех- и одножильных кабелей, прокладываемых треугольником.

Красная линия на номограмме указывает на границу экономической целесообразности перехода от трехжильных кабелей к одножильным. Выше красной линии указаны сечения жил для одножильных кабелей, ниже – для трехжильных. Горизонтальные линии на номограмме указывают на ограничение в виде длительно допустимого тока нагрузки жилы кабеля, рассчитанного в соответствии с [28–30]. Сплошные линии соответствуют удельному тепловому сопротивлению грунта 1,2 К·м/Вт, а штриховые – 1,8 К·м/Вт.

Номограмма экономических интервалов показывает, что ограничение в виде длительно допустимого тока может требовать увеличения сечения относительно экономического тока. Этот факт указывает на то, что целесообразно повышать допустимую токовую нагрузку жил кабелей с точки зрения экономичности. Но при этом требуется не повышать капиталовложения на сооружение кабельной линии.

Использование трехжильных кабелей сечением 95 и 400 мм<sup>2</sup> оказалось нецелесообразным. Аналогичная ситуация наблюдалась и для кабелей

с бумажно-масляной изоляцией [17]. Это происходит в зависимости от распределения цен и сопротивлений жил между соседними сечениями кабелей из номинального ряда.

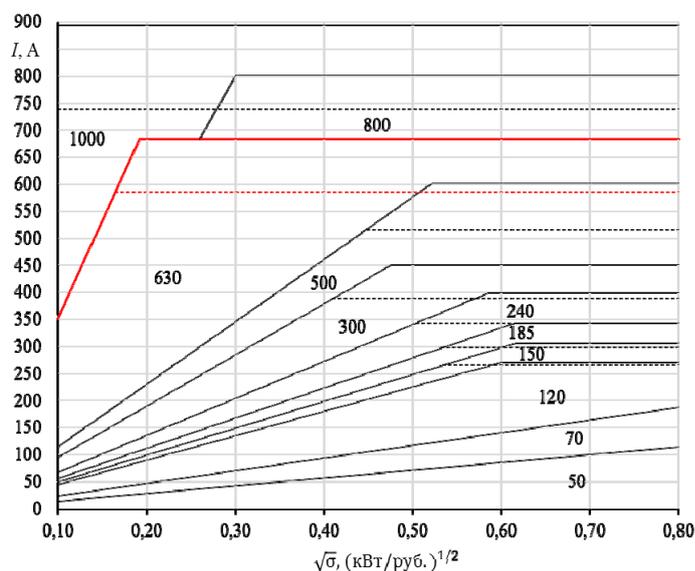


Рис. 3. Номограмма экономических интервалов для выбора сечения и конструкции кабельной линии

Fig. 3. Nomogram of economic intervals for selecting the section and construction arrangement of the cable line

Из рис. 3 видно, что если трехжильные кабели изготавливаются с максимальным сечением 630 мм<sup>2</sup>, одножильные кабели могут быть экономичны лишь при сечении жил 800 мм<sup>2</sup> и выше. До определенного значения токовой нагрузки приведенные затраты для кабельной линии с трехжильным кабелем остаются ниже, чем с одножильными кабелями. Однако при превышении этого порогового значения тока доля затрат, связанных с потерями электроэнергии, становится более существенной для трехжильных кабелей. В таких условиях, несмотря на более высокие капитальные затраты, одножильные кабели оказываются экономически выгоднее. Исходя из проведенного анализа можно сделать вывод о целесообразности производства трехжильных кабелей с максимально возможным сечением. Увеличение максимального изготавливаемого сечения трехжильных кабелей позволит расширить диапазон токовых нагрузок, в котором их применение будет экономически оправдано, и сократить потребность в использовании более дорогостоящих одножильных кабелей.

#### ВЫВОДЫ

1. Комплексный подход к выбору конструкции кабельной линии 10 кВ, учитывающий как капитальные затраты, так и ежегодные издержки, включая потери электроэнергии в экранах кабелей, позволяет достичь опти-

мального технико-экономического решения. Практическая значимость заключается в возможности применения полученных результатов в виде номограмм и методики при проектировании кабельных линий 10 кВ для выбора экономически обоснованных вариантов конструкции.

2. Приведенные затраты на прокладку одножильных кабелей в плоскости при двухстороннем заземлении экранов всегда оказываются больше, чем приведенные затраты на прокладку треугольником за счет увеличения капиталовложений и издержек на потери электроэнергии в экранах.

3. Построена граница экономической целесообразности применения трех- или одножильных кабелей в зависимости от расчетной токовой нагрузки. При номенклатуре трехжильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, производимых с максимальным сечением жилы до 630 мм<sup>2</sup>, одножильные кабели могут быть экономичны только с сечением жил 800 мм<sup>2</sup> и выше. При этом для повышения экономичности кабельных линий стоит изготавливать трехжильные кабели с как можно большим сечением.

4. Представленные в статье результаты носят универсальный характер и могут найти применение не только при проектировании новых кабельных линий, но и при анализе эффективности существующих, а также модернизации и реконструкции городских кабельных сетей среднего напряжения. Это будет способствовать повышению экономичности их эксплуатации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Liu, C. Comparison and Selection of Three-Core Cable and Single-Core Cable / C. Liu // IOP conference series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 300, No. 4. Art. 042047. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/300/4/042047>.
2. Дмитриев, М. В. Однофазные кабели КЛ 6–500 кВ. Выбор взаимного расположения / М. В. Дмитриев // Новости электротехники. 2018. № 5–6. С. 48–51.
3. The Effect of the Vertical Layout on Underground Cable Current Carrying Capacity / A. Ozyesil [et al.] // Energies. 2024. Vol. 17, No 3. P. 674. <https://doi.org/10.3390/en17030674>.
4. Cichy, A. Economic Optimization of an Underground Power Cable Installation / A. Cichy, B. Sakowicz, M. Kaminski // IEEE Transactions on Power Delivery. 2018. Vol. 33, No 3. P. 1124–1133. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2728702>.
5. Cichy, A. Detailed Model for Calculation of Life-Cycle Cost of Cable Ownership and Comparison with the IEC Formula / A. Cichy, B. Sakowicz, M. Kaminski // Electric Power Systems Research. 2018. Vol. 154. P. 463–473. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.09.009>.
6. Multiobjective Optimization of Underground Power Cable Systems / P. Ocloń [et al.] // Energy. 2021. Vol. 215. Art. 119089. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119089>.
7. Optimization of Ampacity in High-Voltage Underground Cables with Thermal Backfill Using Dynamic PSO and Adaptive Strategies / B. A. Atocsa [et al.] // Energies. 2024. Vol. 17, No 5. P. 1023. <https://doi.org/10.3390/en17051023>.
8. Czapp, S. Optimization of Thermal Backfill Configurations for Desired High-Voltage Power Cables Ampacity / S. Czapp, F. Ratkowski // Energies. 2021. Vol. 14, No 5. Art. 1452. <https://doi.org/10.3390/en14051452>.
9. Короткевич, М. А. О целесообразности прокладки вне населенных пунктов кабельных линий электропередачи напряжением 6–35 кВ вместо воздушных / М. А. Короткевич, С. И. Подгайский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 5. С. 463–476. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-65-5-463-476>.

10. Сазонов, П. А. Преимущества применения трехжильного кабеля в сетях среднего напряжения / П. А. Сазонов, А. М. Короткевич // Энергетическая стратегия. 2023. № 6. С. 20–24.
11. Czapp, S. Safety Issues Referred to Induced Sheath Voltages in High-Voltage Power Cables—Case Study / S. Czapp, D. Krzysztof // Applied Sciences. 2020. Vol. 10, No 19. Art. 6706. <https://doi.org/10.3390/app10196706>.
12. Подгайский, С. И. Силовые электрические кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / С. И. Подгайский; Белорусский национальный технический университет. Минск, 2022. 154 с.
13. Дмитриев, М. В. Кабельные линии высокого напряжения / М. В. Дмитриев. СПб.: Политех-пресс, 2021. 688 с.
14. Gouda, O. E. Factors Affecting the Sheath Losses in Single-Core Underground Power Cables with Two-Points Bonding Method / O. E. Gouda, A. A. Farag // International Journal of Electrical & Computer Engineering. 2012. Vol. 2, No 1. <https://doi.org/10.11591/ijece.v2i1.115>.
15. Высоцкий, М. Э. Длительно допустимые токи нагрузки одножильных кабелей напряжением 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена различного конструктивного исполнения / М. Э. Высоцкий // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 4. С. 300–314. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-300-314>.
16. Поспелов, Г. Е. Электрические системы и сети: учеб. / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин, П. В. Лычев. Минск: УП «Технопринт», 2004. 720 с.
17. Блок, В. М. Электрические сети и системы / В. М. Блок. М.: Высш. шк., 1986. 430 с.
18. Герасименко, А. А. Электрические системы и сети: учеб. пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. Ростов-на-Дону: Феникс, 2023. 473 с.
19. Calculation of the Current Rating. Part 3–2: Section on Operating Conditions – Economic Optimization of Power Cable Size: IEC 60287-3-2:2012 [Electronic Resource]. Mode of access: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/22c648b0-31da-4b8b-a73c-90355e4d7914/iec-60287-3-2-2012>.
20. Козлов, В. А. Электроснабжение городов / В. А. Козлов. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1988. 264 с.
21. Короткевич, М. А. Эксплуатация электрических сетей: учеб. / М. А. Короткевич. 2-е изд., испр. и доп. Минск: Вышэйш. шк., 2014. 350 с.
22. Короткевич, М. А. Монтаж электрических сетей: учеб. пособие / М. А. Короткевич. Минск: Вышэйш. шк., 2012. 512 с.
23. Кабели силовые РОСКАБ [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://rscable.ru/catalog/kabeli\\_silovye/](https://rscable.ru/catalog/kabeli_silovye/). Дата доступа: 06.08.2024.
24. Альбом материалов для проектирования и рабочие чертежи № 1.105.03тм. Прокладка силовых кабелей напряжением до 10 кВ в траншеях [Электронный ресурс]. Введ. 26.09.2019. Минск: ГПО «Белэнерго», 2019. Режим доступа: <https://energodoc.by/js/pdfjs/web/viewer.html?file=/file/fulltext-view/7167.pdf>.
25. Единые нормы и расценки [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://belenir.com/enir/sbor>. Дата доступа: 23.05.2024.
26. Передача и распределение электрической энергии: учеб. пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. 4-е изд., стер. М.: Кнорус, 2014. 648 с.
27. Ефентьев, С. Н. Развитие методики технико-экономического анализа при выборе основных параметров электрических сетей с учетом неопределенности исходной информации: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / С. Н. Ефентьев. М., 2004. 205 с.
28. Electric cables – Calculation of the Current Rating. Part 1–1: Current Rating Equations (100 % Load Factor) and Calculation of Losses General: IEC 60287-1-1:2023 [Electronic Resource]. Mode of access: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/164f72dc-b67a-496b-af43-97e28a944a7b/iec-60287-1-1-2023>.
29. Calculation of the Current Rating. Part 2–1: Thermal Resistance – Calculation of Thermal Resistance: IEC 60287-2-1:2023 [Electronic Resource]. Mode of access: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/9a2a6795-afb1-4194-97ae-9eef8d36e808/iec-60287-2-1-2023>.

30. Power Cables with Extruded Insulation and their Accessories for Rated Voltages from 1 kV ( $U_m = 1,2$  kV) up to 30 kV ( $U_m = 36$  kV). Part 2: Cables for Rated Voltages from 6 kV ( $U_m = 7,2$  kV) up to 30 kV ( $U_m = 36$  kV): IEC 60502-2:2014 [Electronic Resource]. Mode of access: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/822b961a-7509-42d8-907a-9fbbb79baad9/iec-60502-2-2014>.

Поступила 19.08.2024 Подписана в печать 21.10.2024 Опубликована онлайн 29.11.2024

#### REFERENCES

1. Liu C. (2019) Comparison and Selection of Three-Core Cable and Single-Core Cable. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 300 (4), 042047. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/300/4/042047>.
2. Dmitriev M. (2018) Single Core 6-500 kV Cables. Mutual Positioning. *Electrical Engineering News*, (5–6), 48–51 (in Russian).
3. Ozyesil A., Altun, B., Demiroglu Y. B., Alboyaci, B. (2024) The Effect of the Vertical Layout on Underground Cable Current Carrying Capacity. *Energies*, 17 (3), 674. <https://doi.org/10.3390/en17030674>.
4. Cichy A., Sakowicz B., Kaminski, M. (2018) Economic Optimization of an Underground Power Cable Installation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33 (3), 1124–1133. <https://doi.org/10.1109/tpwr.2017.2728702>.
5. Cichy A., Sakowicz B., Kaminski M. (2018) Detailed Model for Calculation of Life-Cycle Cost of Cable Ownership and Comparison with the IEC Formula. *Electric Power Systems Research*, 154, 463–473. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.09.009>.
6. Ocloń P., Rerak M., Rao R. V., Cisek P., Vallati A., Jakubek D., Rozegnal B. (2020) Multi-objective Optimization of Underground Power Cable Systems. *Energy*, 215, 119089. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119089>.
7. Atocsa B. A., Puma D. W., Mendoza D., Urday E., Ronceros C., Palma M. T. (2024) Optimization of Ampacity in High-Voltage Underground Cables with Thermal Backfill Using Dynamic PSO and Adaptive Strategies. *Energies*, 2024, 17 (5), 1023. <https://doi.org/10.3390/en17051023>.
8. Czapp S., Ratkowski F. (2021) Optimization of Thermal Backfill Configurations for Desired High-Voltage Power Cables Ampacity. *Energies*, 14 (5), 1452. <https://doi.org/10.3390/en14051452>.
9. Korotkevich M. A., Podgaisky S. I. (2022) On the Expediency of Laying Cable Power Lines with a Voltage of 6–35 kV Outside Settlements Instead of Overhead Power Lines. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (5), 463–476. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-65-5-463-476> (in Russian).
10. Sazonov P. A., Korotkevich A. M. (2023) Advantages of Using a Three-Core Cable in Medium Voltage Networks. *Energeticheskaya strategiya*, (6), 20–24 (in Russian).
11. Czapp S., Dobrzynski K. (2020) Safety Issues Referred to Induced Sheath Voltages in High-Voltage Power Cables. *Applied Sciences*, 10 (19), 6706. <https://doi.org/10.3390/app10196706>.
12. Podhaiskii S. I. (2022) *Power Electric Cables with Cross-Linked Polyethylene Insulation* [dissertation]. Minsk, Belarusian National Technical University (in Russian).
13. Dmitriev M. V. (2021) *High Voltage Cable Lines*. St. Petersburg, Polytekhn-Press Publ. 688 (in Russian).
14. Gouda O. E., Farag A. A. (2011). Factors Affecting the Sheath Losses in Single-Core Underground Power Cables with Two-Points Bonding Method. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 2 (1). <https://doi.org/10.11591/ijece.v2i1.115>.
15. Vysotski M. E. (2004) Long-Term Permissible Load Currents of Single-Core Cables with a Voltage of 10 kV with Cross-Linked Polyethylene Insulation of Various Designs. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (4), 300–314. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-300-314> (in Russian).

16. Pospelov G. E., Fedin V. T., Lychev P. V. (2004) *Electrical Systems and Networks*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 720 (in Russian).
17. Blok V. M. (1986) *Electrical Networks and Systems*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 430 (in Russian).
18. Gerasimenko A. A., Fedin V. T. (2023) *Electrical Systems and Networks*. Rostov-on-Don, Feniks Publ. 473 (in Russian).
19. IEC 60287-3-2:2012. *Electric Cables – Calculation of the Current Rating – Part 3-2: Section on Operating Conditions – Economic Optimization of Power Cable Size*. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/22c648b0-31da-4b8b-a73c-90355e4d7914/iec-60287-3-2-2012>.
20. Kozlov V. A. (1988) *Power Supply of Cities*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. 264 (in Russian).
21. Korotkevich M. A. (2014) *Operation of Electric Networks*. 2<sup>nd</sup> ed. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 350 (in Russian).
22. Korotkevich M. A. (2012) *Installation of Electrical Networks*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 512 (in Russian).
23. *ROSKAB Power Cables*. Available at: [https://rscable.ru/catalog/kabeli\\_silovye/](https://rscable.ru/catalog/kabeli_silovye/) (accessed 08 Juny 2024) (in Russian).
24. *Materials for Design and Working Drawings Arch. No. 1.105.03tm. Laying of Power Cables with a Voltage of up to 10 kV in Trenches*. Minsk, SIA “Belenergo”, 2019. Available at: <https://energodoc.by/js/pdfjs/web/viewer.html?file=/file/fulltext-view/7167.pdf> (in Russian).
25. *Uniform Standards and Prices*. Available at: <https://belenir.com/enir/sbor> (accessed 23 May 2024) (in Russian).
26. Gerasimenko A. A., Fedin V. T. (2014) *Transmission and Distribution of Electrical Energy*. 4<sup>th</sup> ed. Moscow, Knorus Publ. 648 (in Russian).
27. Efentiev S. N. (2004) Development of the Methodology of Technical and Economic Analysis in the Selection of the Main Parameters of Electric Networks, Taking into Account the Uncertainty of the Initial Information [dissertation]. Moscow (in Russian).
28. IEC 60287-1-1:2023. *Electric Cables – Calculation of the Current Rating. Part 1–1: Current Rating Equations (100 % Load Factor) and Calculation of Losses – General*. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/164f72dc-b67a-496b-af43-97e28a944a7b/iec-60287-1-1-2023>.
29. IEC 60287-2-1:2023. *Calculation of the Current Rating. Part 2–1: Thermal Resistance – Calculation of Thermal Resistance*. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/9a2a6795-afb1-4194-97ae-9eef8d36e808/iec-60287-2-1-2023>.
30. IEC 60502-2:2014. *Power Cables with Extruded Insulation and their Accessories for Rated Voltages from 1 kV ( $U_m = 1,2$  kV) up to 30 kV ( $U_m = 36$  kV). Part 2: Cables for Rated Voltages from 6 kV ( $U_m = 7,2$  kV) up to 30 kV ( $U_m = 36$  kV)*. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/822b961a-7509-42d8-907a-9fbbb79baad9/iec-60502-2-2014>.

Received: 19 August 2024

Accepted: 21 October 2024

Published online: 29 November 2024

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-501-515>

УДК 662.7,628.4; 662.8

## **Разработка технологических вариантов использования различных отходов в качестве альтернативных источников энергии на основе многокомпонентных составов твердого топлива**

**А. Н. Пехота<sup>1)</sup>, Б. М. Хрусталеv<sup>1)</sup>, В. П. Голубев<sup>2)</sup>,  
Нгуен Тху Нга<sup>3)</sup>, Ву Минь Фан<sup>4)</sup>**

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>РНПУП «Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси»  
(Минск, Республика Беларусь),

<sup>3)</sup>Электроэнергетический университет (Ханой, Вьетнам),

<sup>4)</sup>Научно-технологический институт энергетики и окружающей среды  
Вьетнамской академии наук и технологий (Ханой, Вьетнам)

**Реферат.** В статье рассмотрены перспективные направления решения проблем энерго- и ресурсосбережения, а также вопросы рационального использования природных и вторичных ресурсов, образующихся в производственной и коммунальной деятельности. Представлены аспекты исследований и разработки технологических вариантов использования различных отходов на основе многокомпонентных составов твердого топлива в качестве альтернативных источников энергии. Дан анализ организации обращения и переработки отходов производства и потребления, отражены объемы образования коммунально-бытовых отходов, дана оценка морфологическому составу образующихся в настоящее время отходов в областных центрах Республики Беларусь и г. Минске с учетом морфологического состава. Представлены основные этапы разработанных и применяемых технологий брикетирования и сжигания многокомпонентных смесей на основе различных горючих отходов. Описаны основные научные и технические решения, связанные с применением комплекса топливосжигающего оборудования, рассмотрены температурные параметры процесса термохимической деструкции топливных элементов с целью получения высококалорийного газообразного топлива и его использования в процессе сжигания в камере дожига локальной модульной установки, обеспечивающей экологичное сжигание твердых коммунальных и производственных горючих отходов. Рассмотрен разработанный алгоритм решения поставленной задачи, позволяющий рационально использовать некондиционные горючие производственные коммунально-бытовые отходы для получения многокомпонентного твердого топлива, соответствующего критериям качества по энергетическим

---

### **Адрес для переписки**

Пехота Александр Николаевич  
Белорусский национальный  
технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 379-76-22  
pehota.an@bntu.by

### **Address for correspondence**

Pekhota Alexander N.  
Belarusian National  
Technical University  
65, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 379-76-22  
pehota.an@bntu.by

---

и экологическим показателям. Изложены результаты прикладных исследований, непосредственно связанные с качественной оценкой многокомпонентного брикетизируемого топлива, при которых достигаются наилучшие производственные и потребительские показатели энергетического качества и экологичности.

**Ключевые слова:** горючие отходы, твердое топливо, многокомпонентный состав, коммунальные отходы, мездра, скоп, теплота сгорания, технология брикетирования, выбросы, вредные вещества, альтернативное топливо, древесные отходы

**Для цитирования:** Разработка технологических вариантов использования различных отходов в качестве альтернативных источников энергии на основе многокомпонентных составов твердого топлива / А. Н. Пехота [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 6. С. 501–515. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-501-515>

## Development of Technological Options for the Use of Various Wastes as Alternative Energy Sources Based on Multicomponent Compositions of Solid Fuels

A. N. Pekhota<sup>1</sup>), B. M. Khrustalev<sup>1</sup>), V. P. Golubev<sup>2</sup>),  
Nguyen Thuy Nga<sup>3</sup>), Vu Minh Phap<sup>4</sup>)

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2</sup>Republican Scientific and Production Unitary Enterprise “Institute of Energetics of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>3</sup>University of Electricity (Hanoi, Vietnam),

<sup>4</sup>Institute of Science and Technology for Energy and Environment of Vietnam Academy of Science and Technology (Hanoi, Vietnam)

**Abstract.** The article considers promising areas for solving problems of energy and resource conservation, as well as issues of rational use of natural and secondary resources generated in industrial and communal activities. The aspects of research and development of technological options for the use of various wastes based on multicomponent compositions of solid fuels as alternative energy sources are presented. Also presented are the main stages of the developed and applied technologies for briquetting and incineration of multicomponent mixtures based on various combustible waste. The developed algorithm for solving the problem under consideration which makes it possible to rationally use substandard combustible industrial municipal waste to obtain multicomponent solid fuel that meets the quality criteria for energy and environmental indicators is reviewed. The results of the applied research directly related to the qualitative assessment of multicomponent briquetted fuels and facilitating achievement of the best production and consumer indicators values of energy quality and environmental friendliness are presented.

**Keywords:** combustible waste, solid fuel, multicomponent composition, municipal waste, scrapings, sludge, heat of combustion, briquetting technology, emissions, harmful substances, alternative fuels, wood waste

**For citation:** Pekhota A. N., Khrustalev B. M., Golubev V. P., Nguyen Thuy Nga, Vu Minh Phap (2024) Development of Technological Options for the Use of Various Wastes as Alternative Energy Sources Based on Multicomponent Compositions of Solid Fuels. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (6), 501–515. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-501-515> (in Russian)

### Введение

Жизнь и производственная деятельность человека всегда сопровождаются образованием большого количества различных отходов (как произ-

водственных, так и коммунально-бытовых). Человечество все больше потребляет и производит, а следовательно, возрастает расходование ресурсов и образование отходов. Из-за урбанизации и роста крупных городов и мегаполисов радикальным изменениям подвергается и потребление населения, что также содействует увеличению объемов отходов. Накапливаясь, они наносят вред природе и здоровью человека. В настоящее время в мире остро стоят вопросы оптимизации объемов накопления и утилизации производственных и твердых коммунально-бытовых отходов. Не менее остра и актуальна эта проблема и для Республики Беларусь. В отходах городов и поселков содержатся как ценные металлы (черные и цветные), так и другие отходы потребления, такие как бумага, картон, стекло, пластики, пластмассы, полиэтилен, кожа, резина, дерево, пищевые отходы.

Стратегия перехода к ресурсосберегающей экономике не может содержать универсальных для всех стран технологических подходов и методов. Ресурсосберегающая экономика во многом зависит от сложившихся политических, технологических и социальных условий, показателей развития общества и его уровня потребления и производства, обеспеченности природными ресурсами и других факторов. Учитывая глобальные изменения топливно-энергетического рынка, особенно в последние годы, многие страны уделяют значительное внимание технологиям, обеспечивающим эффективное использование производственных, коммунально-бытовых отходов и биомассы с применением технологий получения и сжигания биогаза и твердого топлива. Такие достижения в использовании нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в энергетике возможны только за счет накопленного исследовательского, технологического и практического опыта вовлечения горючих производственных и коммунально-бытовых отходов, а также образующейся биомассы как источников химической энергии.

В Республике Беларусь, как и в других странах, произошел значительный рост объемов производственных и твердых коммунально-бытовых отходов. Это связано с радикальными переменами в характере потребления и изменениями в производстве товаров и оказании услуг. Например, общий объем образования твердых коммунальных отходов за 2022 г. составил более 63 млн т, а объем образования твердых коммунальных отходов (ТКО), по данным Министерства жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь, достиг 4,2 млн т в год, из них 73 % – отходы населения и 27 % – отходы производства. В настоящее время каждый белорус выбрасывает более 400 кг бытовых отходов за год, что в три раза больше, чем 20 лет назад, а показатель удельного образования ТКО составляет около 0,92 кг/чел.-день [1–4].

Это свидетельствует об остроте проблем энерго- и ресурсосбережения, а также о необходимости рационального использования природных и вторичных материальных ресурсов (ВМР). В то же время последними исследованиями установлено, что экономически оправданное применение горючих твердых

коммунально-бытовых и производственных отходов как альтернативного энергетического топлива позволяет сэкономить не менее 26 % мировой энергетической потребности, причем для развивающихся стран этот процент экономии будет изменяться только в направлении увеличения.

### **Актуальность использования горючих отходов**

Ежегодный рост объемов образования отходов опережает современные экономические и технологические возможности их применения, обезвреживания и утилизации. В современном мире устойчиво доминирует их извлечение с последующим складированием на специальных полигонах. Например, в Беларуси для этих нужд отведены значительные площади полигонов, суммарно составляющие более 3,5 тыс. га, более 40 % которых уже полностью задействованы, требуется их дальнейшее расширение [1–4]. Основной целью деятельности в сфере обращения с отходами производства и потребления является снижение или стабилизация их отрицательного воздействия на состояние окружающей среды, а также предотвращение негативного влияния на здоровье людей, животных и растительный мир.

Международные тенденции в области обращения с отходами стремятся к иерархической последовательности методов обращения, обеспечивающих экологическую безопасность, по принципу – от наиболее приоритетных методов утилизации к менее приоритетным: 1) предотвращение образования отходов; 2) уменьшение их образования или их минимизация; 3) повторное использование и переработка отходов; 4) их использование для получения энергии; 5) захоронение отходов.

Важным аспектом для организации обращения и переработки отходов производства и потребления является определение объемов образования с учетом морфологического состава.

Традиционно в морфологическом составе выделяют от 10 до 15 компонентов. Например, в составе ТКО преобладающими компонентами с различным фракционным составом в отношении к их общей массе являются: органические отходы – от 30 до 40 %; полимерные отходы и пластмассы – 7–10; стекло и стеклобой – до 6; бумага – до 6; металлы – около 2; тетрапаки – 2–3 % [1–4]. Морфологические составы ТКО в Минске, областных центрах, малых городах и сельских населенных пунктах республики существенно различаются. В то же время морфологический состав отходов подвержен изменению в течение года.

В табл. 1 представлен усредненный по годам морфологический состав образующихся ТКО в Беларуси [1–4]. Как видно из данных таблицы, ТКО по своему морфологическому составу обладают ресурсно-ценными компонентами и сырьевым потенциалом с устойчивым объемом образования.

Таблица 1

**Усредненный морфологический состав отходов в Беларуси**  
**The average morphological composition of waste in Belarus**

Наименование компонента	Минск	Областные центры	Крупные города	Малые города
Древесина	1,16	1,18	1,1	0,13
Бумага, картон, гофрокартон	2,43	2,1	1,8	2,21
Металлы	0,63	0,56	0,53	0,4
Текстиль, ветошь	3,64	3,1	1,86	1,92
Кожа, резина, шины	0,25	0,65	0,34	0,1
Стекло	6,17	7,45	7,4	6,9
Полимеры, в том числе	11,8	15,4	11,7	7,1
ПЭТ тара	3,56	2,86	2,33	1,96
полиэтилен	2,9	2,89	1,48	1
полипропилен	0,5	0,45	0,26	0,1
полистирол	0,6	0,34	0,3	0,1
прочий пластик, в том числе неперерабатываемый	3,98	3,56	3,1	1,8
Пищевые и растительные отходы	22,6	38,5	28,8	24,6
Инертные отходы (камни, кирпичи и т. п.)	2,0	2,8	2,6	2,0
Потенциально опасные отходы (элементы питания, медицинские отходы)	0,46	0,34	0,02	0,01
Смешанные отходы	28,1	24,9	31,1	13,8
Отсев мелких фракций	12,1	12,2	21,6	13,4

Также одним из ресурсно-ценных является коммунальный отход в виде осадка сточных вод (ОСВ) городских очистных сооружений. Проблема использования ОСВ с применением типовых распространенных технологий заключается в его повышенной влажности в исходном состоянии. При этом осадки сточных вод представляют собой дисперсную систему, степень дисперсности которых колеблется от 10 до  $10^7 \text{ см}^{-1}$ , что позволяет рассматривать осадки как коллоиды с повышенной вязкостью. Вязкость неоднородных масс, в частности осадков сточных вод, до сих пор еще не изучена ввиду исключительного разнообразия явлений и сложности вопроса. Однако на основании данных, полученных при проведении комплекса исследований, установлено, что ОСВ, обладая повышенной вязкостью и высокой теплотой сгорания (16,7–18,4 МДж/кг [5, 9]), может быть эффективно применен в многокомпонентном брикетировании.

Из промышленных видов горючих отходов в проводимых исследованиях использовалась мездра кожи крупного рогатого скота. Мездра – это слой подкожной жировой клетчатки, мяса, сала, кусков сухожилий, которые удаляются со шкуры в процессе осуществления подготовительных опера-

ций. В мездре свежей шкуры содержится до 75–80 % воды, остальное – жировые и белковые вещества. Сам процесс удаления со шкуры прирезей сала, мяса и жировой клетчатки называется мездрением. Соотношение основных компонентов шкуры (белки, жиры, углеводы) может варьироваться и зависит от состояния животного перед забоем. Причем основные органические компоненты – белки и жиры – вполне пригодны для использования в качестве энергетического ресурса. Так, жиры при полном сгорании выделяют калорийность в пределах 42–48 МДж/кг [6] в зависимости от процентного соотношения жирных кислот.

Современные концепции обращения с ТКО, как правило, базируются на максимальном использовании ресурсно-ценного потенциала компонентов, входящих в состав ТКО. При этом состав отходов, поступающих на переработку, влияет на степень отбора вторичного сырья на мусоросортировочных заводах, определяет калорийность отходов при использовании термических методов утилизации и эффективности процессов разложения при использовании биотехнологий, что зачастую влияет на технико-экономические показатели той или иной технологии.

#### **Исследование термических параметров сжигания альтернативных видов твердого топлива**

Производство альтернативных видов топлива ориентировано на выработку недорогих энергетических ресурсов за счет использования энергоэффективных, ресурсосберегающих технологий и методов подготовки и переработки отходов различных предприятий. Это в большинстве случаев обеспечивает сокращение объемов образования отходов. В зависимости от направления деятельности предприятий и видов используемого сырья отходы могут различаться и иметь свои особенности. Доступными источниками энергоресурсов для многих стран являются отходы коммунально-бытового хозяйства и биомасса различного происхождения, образующаяся в результате хозяйственной деятельности. В связи с этим при разработке технологических вариантов использования различных отходов в качестве альтернативных источников энергии предпочтение отдается их вторичному использованию с последующей термической утилизацией, что, по оценке экспертов, является наиболее разумным в условиях формирующихся тенденций перехода в перспективе к энерго- и ресурсосберегающей экономике.

Стоит отметить, что развитые страны активно разрабатывают различные составы, производят и сжигают твердое восстановленное топливо (англ. refused derived fuel – RDF), которое преимущественно получается с использованием твердых бытовых отходов (ТБО). Оно состоит в основном из горючих компонентов ТБО, таких как пластик и биоразлагаемые отходы. Технологии производства альтернативного RDF в разных странах и регионах имеют различия. Использование такого топлива, как правило, предусмотрено на промышленных предприятиях. Теплотворная способ-

ность RDF, полученного с использованием различных технологий, составляет 13–23 МДж/кг [5, 7, 9].

С ростом благосостояния объемы образования горючих промышленных и коммунальных отходов ежегодно увеличиваются, а использование некоторых в значительной мере затруднено ввиду отсутствия экономически выгодных и экологически безопасных технологий, обеспечивающих их переработку и рациональное использование.

БНТУ совместно с Институтом энергетики Национальной академии наук Беларуси, Электроэнергетическим университетом и Научно-технологическим институтом энергетики и окружающей среды Вьетнамской академии наук и технологий проводят научные исследования по созданию аналога RDF, которое авторами [5, 7–9] названо многокомпонентным твердым топливом (МТТ), а для англоязычных стран топливо имеет название – MSF (англ. – multicomponent solid fuel) [5]. Принципиальная схема последовательности технологических операций производства многокомпонентного твердого топлива представлена на рис. 1.

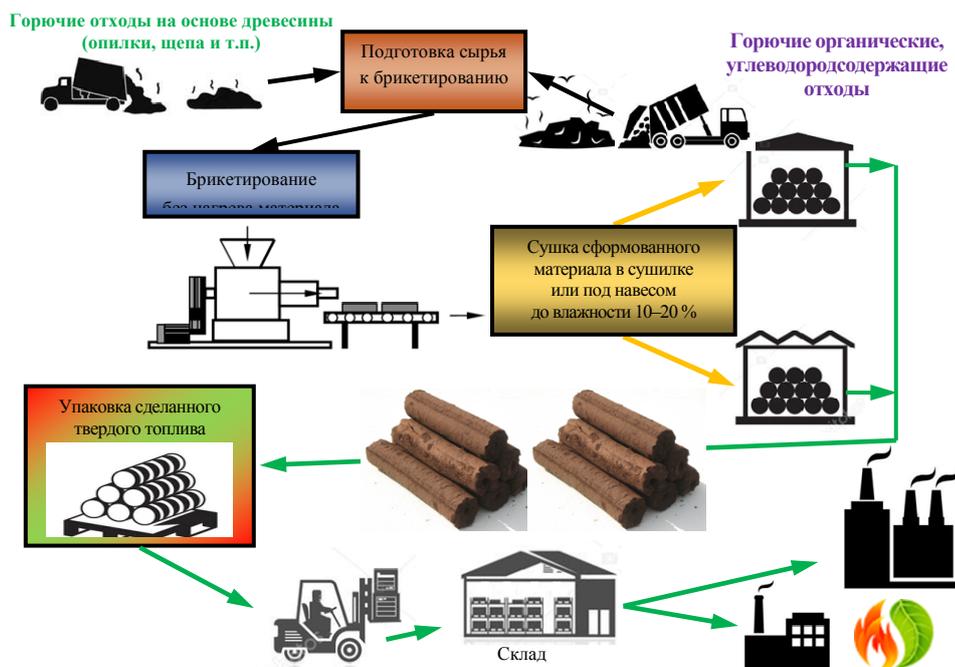


Рис. 1. Схема последовательности технологических операций действующего производства MSF

Fig. 1. Sequence diagram of technological operations of the current MSF fuel production

Технологическая схема последовательности операций многокомпонентного брикетирования (рис. 1) представляет собой использование различных измельченных горючих отходов растительно-древесного происхождения (РД отходов). К ним, как правило, относят отходы деревообработки, лесозаготовок, солому, лузгу, костру и т. п. Они в большинстве разрабо-

танных многокомпонентных составов являются базовым компонентом, к которому можно добавлять другие виды горючих отходов в определенном (исследованном) соотношении. Например, возможно добавление таких горючих компонентов, не нашедших технологического применения (НТП), как осадки сточных вод очистных сооружений, мездра, скоп, отходы животноводства и птицеводства, коммунально-бытовые отходы, отработанные нефтесодержащие сорбенты, опилки и ветошь, насыщенные нефтепродуктами, и т. п. Важным условием их применения является определенный технологический цикл подготовки этих материалов, который рассматривался в [7–9]. Причем очевидно, что оптимальным направлением при разработке максимально эффективного, с энергетической точки зрения, MSF является включение в его состав только компонентов, обладающих высокой удельной теплотворной способностью.

В то же время необходимо отметить, что жиры и белки могут являться сырьем для получения высококалорийного газообразного топлива, поэтому отказываться от такого источника тепловой энергии не рационально. Основная проблема при использовании мездры для получения тепловой энергии – очень большое количество воды. Также является непростой задачей технология сжигания или пиролиза мездры. При повышении температуры произойдет расплавление жиров, образование белково-жирового «бульона», который имеет малую поверхность и поэтому скорость его горения или пиролиза будет небольшой [10].

При этом применение брикетирования мездры, например с опилками или щепой, позволяет получать MSF, которое имеет приемлемую влажность (в пределах 20–30 %), плотную геометрическую форму (квадрат, круг, прямоугольник и т. п.), оптимальный компонентный состав, что позволяет полученное многокомпонентное топливо использовать как для сжигания, так и для пиролиза.

Для сжигания стандартизированных (традиционных) видов топлива технологические параметры в достаточной степени отработаны, однако в случае использования в качестве топлива многокомпонентных смесей из отходов могут возникать определенные экологические риски. В связи с этим предпочтительнее разработать комплекс топливосжигающего оборудования и оптимальный многокомпонентный состав топливной смеси, который может экологически безопасно и экономически выгодно использоваться в качестве топлива.

В настоящее время наибольшее распространение получают термические методы утилизации отходов. Причем наилучшим эффектом обладает оборудование, технологически обеспечивающее инсинерацию процесса утилизации отходов. Главное отличие инсинераторов от других котлов и топливосжигающих устройств заключается в наличии специальной камеры дожигания, которая обеспечивает полное обезвреживание помещенных в топку горючих отходов посредством нагнетания температуры вплоть до 1200 °С и выше [10, 11]. Эта технология в основном используется в Европе для сжигания опасных отходов во вращающихся печах, однако этот процесс может быть применен и усовершенствован в условиях Республики Беларусь для других типов топливосжигающих устройств с созданием новых

схем модульного сжигания горючих отходов различных производств, не нашедших технологического применения в иных технологиях [8].

Применяемый для исследования комплекс топливосжигающего оборудования создан с учетом возможности инсинерации процесса утилизации отходов, что позволяет использовать некоторые виды однокомпонентных отходов без подготовки, а также разработанные многокомпонентные составы твердого топлива. Данное оборудование создано по модульному принципу. Каждый модуль выполняет свою функцию, но обеспечивает согласованную и безопасную работу всего комплекса. Модульный принцип позволяет легко адаптировать комплекс оборудования как для горючих отходов, имеющих сложный многокомпонентный или даже неизвестный состав, так и для отходов хорошо известного и постоянного состава. Провести адаптацию (настройку) одного модуля проще, быстрее и дешевле, чем приспособлять (переделять) весь комплекс оборудования под новый вид отходов.

Основные научные и технические решения разработанного комплекса топливосжигающего оборудования представлены на рис. 2 в виде структурно-технологической схемы модульного типа.

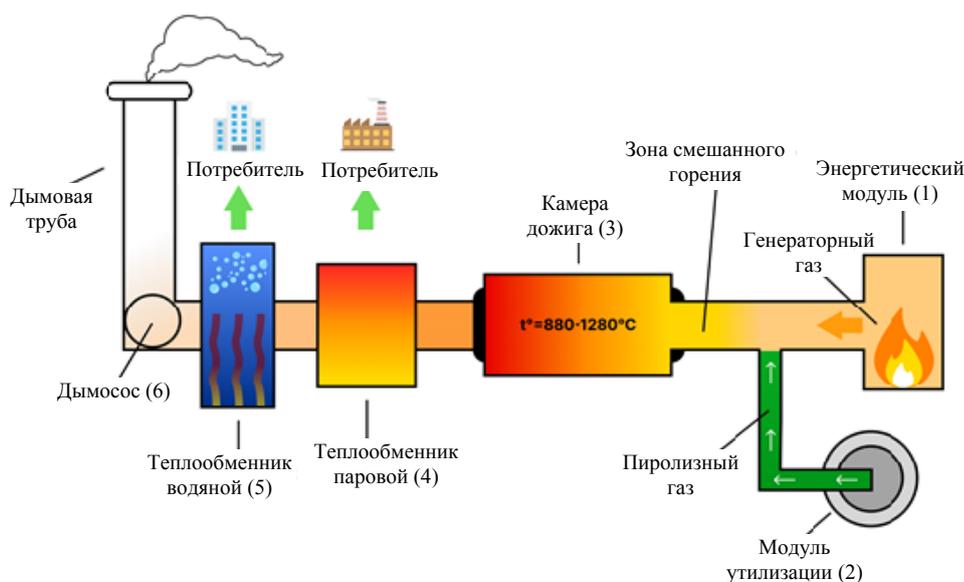


Рис. 2. Структурно-технологическая схема топливосжигающей установки модульного типа

Fig. 2. Structural and technological scheme of a modular type fuel combustion plant

В энергетическом модуле 1 при контролируемой подаче воздуха утилизируются энергоемкие органические отходы с образованием генераторного газа. В камеру дожига 3 поступает генераторный газ, который создает постоянный факел пламени. В модуле утилизации 2 идет процесс пиролиза органических отходов I–IV классов опасности в бескислородной среде. Пиролизный газ также поступает в камеру дожига, где происходит его смешивание с генераторным газом. При этом температура в камере дожига значительно превышает требуемую для обезвреживания особо опасных отходов, достигая 1200 °C и более, что обеспечивает очистку дымовых га-

зов даже от стойких органических загрязнителей (диоксины, фураны, пестициды). Вместе с тем стоит отметить, что в качестве минимально необходимой рабочей температуры горения генераторного газа определена температура для обезвреживания медицинских и фармацевтических отходов (850 °С), которая установлена постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 22.11.2002 № 81 «Об утверждении Инструкции о правилах и методах обезвреживания отходов лекарственных средств, изделий медицинского назначения и медицинской техники».

Далее дымовые газы охлаждаются до требуемых температур, проходят через теплообменник, подогревая воду, используемую для отопления производственных помещений, горячего водоснабжения и технологических нужд производства, выходя после этого в атмосферу.

На рис. 3 представлены температурные параметры процесса термохимической деструкции многокомпонентных топливных элементов с использованием мездры и опилок с целью получения высококалорийного газообразного топлива.

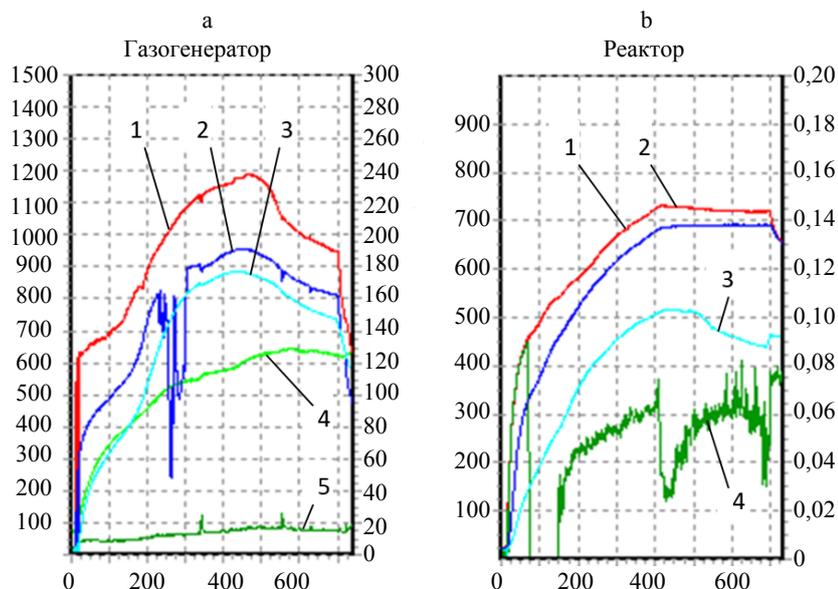


Рис. 3. Температурные параметры процесса термохимической деструкции топливных элементов с целью получения высококалорийного газообразного топлива: а – 1 – температура горения генераторного газа; 2 – то же смеси генераторного газа и пиролизного газа; 3–5 – температуры в разных участках газового тракта (при такой постановке эксперимента эти температуры не имеют практического значения); б – 1 – температура трубчатого электронагревателя; 2 – то же в камере пиролиза; 3 – то же пиролизного газа, выходящего из камеры пиролиза; 4 – резервная термопара (при такой постановке эксперимента эти температуры не имеют практического значения)

Fig. 3. Temperature parameters of the process of thermochemical destruction of fuel cells in order to obtain high-calorie gaseous fuel: а – 1 – the combustion temperature of the generator gas; 2 – the combustion temperature of the mixture of generator gas and pyrolysis gas; 3–5 – temperatures in different sections of the gas path (when the experiment is set up in such a way, these temperatures have no practical importance); б – 1 – temperature of the tubular electric heater; 2 – temperature in the pyrolysis chamber; 3 – temperature of the pyrolysis gas coming out of the pyrolysis chamber; 4 – backup thermocouple (when the experiment is set up in such a way, these temperatures have no practical importance)

Как видно из рис. 3а (генератор), температура горения генераторного газа 1 выходит на небольшое плато температур около 700 °С (временная единица 10). После временной единицы 100 начинается постепенный рост температуры горения до 1190 °С. Такое плавное повышение температуры связано с равномерным поступлением в камеру дожига порций горючих газообразных продуктов. Исходя из такого роста температуры и продолжительного времени подъема температур, можно предположить, что процесс образования горючего газа является равномерным на протяжении всего времени пиролиза. Это говорит о высоком качестве брикетированных многокомпонентных топливных элементов для получения высококалорийного газообразного топлива. После временной единицы 470 начинается плавное понижение температуры, связанное с постепенным завершением процесса пиролиза.

Более информативно процесс пиролиза прослеживается при рассмотрении графика температур горения смеси генераторного газа и пиролизного газа 2. После энергичного роста температуры до уровня 800 °С (временной интервал 220) происходит серия падений и подъемов температуры. Первое падение температуры связано с поступлением в камеру дожига паров влаги, образовавшихся в результате «досушивания» топливных элементов в камере. Обращает на себя внимание резкий подъем температуры с 250 до 800 °С (временная единица 260). Очевидно, влаги было незначительное количество, что способствовало быстрому формированию и выходу горючего газа.

Этим газом может быть аммиак, который образовался в результате пиролиза белковых молекул, а при концентрациях 15–28 % по объему в воздухе он способен гореть [11]. Такие концентрации аммиака могли образоваться в короткий временной интервал, что вызвало быстрый рост и падение температуры. Учитывая высокое содержание белка в мездре, такое развитие событий весьма вероятно. Дальнейшее падение температуры могли вызвать другие негорючие продукты пиролиза (например, углекислый газ, азот и его окислы) [10].

В ходе продолжающегося пиролиза происходит дальнейшее повышение температуры за счет термохимической деструкции жиров и остатков белковых молекул. Такой быстрый рост температуры свидетельствует о термохимической деструкции одинаковых или очень близких по химическому составу веществ в составе сжигаемого топлива. Логично предположить, что это были в основном молекулы липидов, которые составляют основную часть жирового компонента мездры. Небольшое плато с температурой около 900 °С свидетельствует о разложении большого количества одинаковых или очень близких по химической структуре молекул.

При дальнейшем нагреве происходят плавное повышение температуры до 950 °С и такое же плавное ее снижение в связи с уменьшением количества образующегося пиролизного газа.

Значительный интерес представляют процессы, проходящие в камере пиролиза при термохимической деструкции топливных элементов. Как следует

из данных, представленных на рис. 3b (реактор), наблюдался практически линейный подъем температуры трубчатых электронагревателей (ТЭН) до температуры около 450 °С. После достижения этой температуры скорость повышения температуры ТЭНов существенно замедлилась. Это говорит о том, что в камере пиролиза начали происходить процессы, связанные с энергичным поглощением тепловой энергии. Очевидно, что на начальной стадии процесса энергичное поглощение энергии связано с испарением влаги (досушивание топливных элементов). На это указывает замедление скорости повышения температуры внутри камеры пиролиза. После испарения влаги скорости подъема температур ТЭНов и температуры внутри камеры пиролиза выравниваются и становятся практически параллельными.

Вид исследуемого MSF (на основе мездры и опилок), примененного в эксперименте в модульной установке сжигания, представлен на рис. 4а. Полученный твердый остаток после пиролиза в виде обугленных образований (органического угля) представлен на рис. 4б.



Рис. 4. Вид исследуемого MSF в модульной установке до и после пиролиза:  
а – брикетированное твердое топливо из смеси мездры и опилок; б – обугленные образования брикетов после пиролиза

Fig. 4. Type of MSF under study, in a modular installation before and after pyrolysis:  
а – briquetted solid fuel from a mixture of scrapings and sawdust;  
b – charred briquette formations after pyrolysis

Твердый обугленный остаток после пиролиза имеет калорийность 18–20 МДж/кг, что позволяет использовать его в любых твердотопливных котлах или в качестве сырьевого ресурса, востребованного в системах очистки промышленных стоков, газовых выбросов предприятий, в литейном производстве, химической промышленности, сельском хозяйстве, транспортной сфере.

Актуальность решения проблем переработки горючих отходов с использованием доступных технологий подтверждается возросшим интересом к ее применению не только в Республике Беларусь, но и в ряде стран Западной Европы (Сербия, Румыния) и Азии (Вьетнам), где проведен ряд совместных экспериментальных и теоретических исследований по использованию коммунальных и производственных отходов [7, 12–15].

## ВЫВОДЫ

1. Технология изготовления многокомпонентного твердого топлива методом брикетирования дает возможность применять широкий спектр малоиспользуемых горючих отходов в качестве твердого топлива с возможностью их сжигания как в специализированных, так и в различных теплогенерирующих устройствах с получением высоких энергогенерирующих параметров горения и экологичности.

2. Научная новизна данных технологий брикетирования и сжигания, а также накопленный практический опыт и результаты проведенных исследований характеристик составов топлива и инструментальные замеры выбросов вредных веществ при сжигании MSF с использованием в составе наиболее распространенных видов отходов, образующихся на предприятиях промышленности и коммунального хозяйства, объективно показывают энергоэффективность, экологичность конечной утилизации, быструю экономическую окупаемость и перспективность внедрения технологий получения MSF.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Об утверждении Концепции создания мощностей по производству альтернативного топлива из твердых коммунальных отходов и его использования [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 22.08.2016, № 664. Режим доступа: <https://government.by/upload/docs/file69078b9e10018d70.PDF>. Дата доступа: 01.05.2024.
2. Об объемах сбора вторичных материальных ресурсов и отходов товаров и упаковки, размерах расходования денежных средств, полученных от производителей и поставщиков. Отчет за 2022 год [Электронный ресурс] / Государственное учреждение «Оператор вторичных материальных ресурсов». Режим доступа: [https://vtoroperator.by/sites/default/files/otchet\\_2022.pdf](https://vtoroperator.by/sites/default/files/otchet_2022.pdf). Дата доступа: 21.07.2024.
3. Об объемах сбора вторичных материальных ресурсов и отходов товаров и упаковки, размерах расходования денежных средств, полученных от производителей и поставщиков, в 2023 году. Отчет за 2023 год [Электронный ресурс] / Государственное учреждение «Оператор вторичных материальных ресурсов». Режим доступа: <https://vtoroperator.by/upload/iblock/fd7/ilt3sfwfhlg207vyz2cd975t3umj2q/%D0%9E%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82%D0%9E%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B0%20%D0%92%D0%9C%D0%A0%20%D0%B7%D0%B0%202023%20%D0%B3%D0%BE%D0%B4.pdf>. Дата доступа: 21.07.2024.
4. Труш, Я. В. Анализ данных изучение морфологического состава коммунальных отходов в Республике Беларусь / Я. В. Труш, Е. А. Ботян // Экологическая безопасность 1991–2021: сб. материалов заочной науч.-практ. конф., посвященной юбилейной дате образования РУП «Бел НИЦ «Экология» / РУП «Бел НИЦ «Экология»; сост. В. М. Конькова. Минск: РУП «Бел НИЦ «Экология», 2021. С. 152–156.
5. Пехота, А. Н. Многокомпонентное твердое топливо / А. Н. Пехота. Гомель: БелГУТ, 2021. 243 с.
6. Косивцов, Ю. Ю. Технология пиролиза органических материалов / Ю. Ю. Косивцов, Э. М. Сульман. Тверь: ТГТУ, 2010. 124 с.
7. Технология производства многокомпонентного твердого топлива с использованием отходов сточных вод / А. Н. Пехота [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 6. С. 525–537. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-525-537>.

8. Пехота, А. Н. Эффективный способ термической утилизации горючих отходов различных производств / А. Н. Пехота, В. П. Голубев, А. А. Бойко // Энергоэффективность. 2024. № 6. С. 20–26.
9. 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>.
10. Пиролиз древесины: теоретический и практический аспекты / М. В. Малько [и др.]. Минск: Беларуская навука, 2023. 118 с.
11. Science and Technology of Ammonia Combustion / Н. Kobayashi [et al.] // Proceedings of the Combustion Institute. 2019. No 37 (1). P. 109–133. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.029>.
12. Пехота, А. Н. Исследование теплотехнических свойств брикетов на основе осадков сточных вод городских очистных сооружений / А. Н. Пехота, Р. Н. Вострова, В. Н. Грибанов // Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве: материалы II Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т. Минск: Ин-т ЖКХ НАН Беларуси, 2020. Т. 2. С. 99–108.
13. Пехота, А. Н. Исследование энергетических характеристик многокомпонентного твердого топлива с использованием некондиционных горючих коммунальных и производственных отходов / А. Н. Пехота // Наука и техника. 2022. Т. 21, № 2. С. 164–174. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-164-174>.
14. Технология производства MSF-топлива – направление, обеспечивающее переход к циркулярной экономике / Б. М. Хрусталева [и др.] // Наука и техника. 2022. Т. 21, № 4. С. 340–348. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-340-348>.
15. Пехота, А. Н. Использование углеводородсодержащих отходов в технологии многокомпонентного брикетирования твердого топлива / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталева // Промышленная энергетика. 2022. № 9. С. 53–61.

Поступила 19.08.2024    Подписана в печать 22.10.2024    Опубликована онлайн 29.11.2024

#### REFERENCES

1. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of August 22, 2016 No 664 on Approval the Concept of Creating Capacities for the Production of Alternative Fuel from Municipal Solid Waste and on its Use. Available at: <https://government.by/upload/docs/file69078b9e10018d70.PDF> (accessed 05 January 2024) (in Russian).
2. State Institution “Operator of Secondary Material Resources”. *On the Amount of Collection of Secondary Material Resources and Waste of Goods and Packaging, and on the Amount of Expenditure of Money Received from Manufacturers and Suppliers. Report for 2022*. Available at: [https://vtoroperator.by/sites/default/files/otchet\\_2022.pdf](https://vtoroperator.by/sites/default/files/otchet_2022.pdf). (accessed 21 July 2024) (in Russian).
3. State Institution “Operator of Secondary Material Resources”. *On the Amount of Collection of Secondary Material Resources and Waste of Goods and Packaging, and on the Amount of Expenditure of Money Received from Manufacturers and Suppliers in 2023. Report for 2023*. Available at: <https://vtoroperator.by/upload/iblock/fd7/iltp3sfwfhlg207vyz2cd975t3umj2q/%D0%9E%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82%D0%9E%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B0%D0%92%D0%9C%D0%A0%D0%B7%D0%B0%202023%D0%B3%D0%BE%D0%B4.pdf>. (accessed 21 July 2024) (in Russian).
4. Trush Ya. V., Botyan E. A. (2021) Analysis of Data from Studying the Morphological Composition of Municipal Waste in the Republic of Belarus. *Ekologicheskaya Bezopasnost' 1991–2021: sb. materialov zaochnoi nauch.-prakt. konf., posvyashchennoi yubileinoi date obrazovaniya RUP «Bel NITs «Ekologiya»* [Environmental Safety 1991-2021: a Collection of Mate-

- rials from a Correspondence Scientific and Practical Conference Dedicated to the Anniversary of the Formation of RUE “Bel SRC “Ecology”. Minsk, RUE “Bel SRC “Ecology”, 152–156 (in Russian).
5. Pekhota A. N. (2021) *Multicomponent Solid Fuel*. Gomel, Belarusian State University of Transport. 242 (in Russian).
  6. Kosivtsov Yu. Yu., Sul'man E. M. (2010) *Technology of Pyrolysis of Organic Materials*. Tver, TSTU. 124 (in Russian).
  7. Pekhota A. N., Khroustalev B. M., Vu M. P., Romaniuk V. N., Pekhota E. A., Vostrova R. N., Nguyen T. N. (2021) Multicomponent Solid Fuel Production Technology Using Waste Water. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (6), 525–537. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-525-537> (in Russian).
  8. Pekhota A. N., Golubev V. P., Boyko A. A. (2024) Effective Method of Thermal Utilization of Combustible Waste from Various Industries. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, (6), 20–26 (in Russian).
  9. Pekhota A. N., Filatov S. A. (2022) Investigation of Energy Properties of Briquetted Multicomponent 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).
  10. Mal'ko M. V., Vasilevich S. V., Dobrego K. V., Degterov D. V. (2023) *Pyrolysis of Wood: Theoretical and Practical Aspects*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 117 (in Russian).
  11. Kobayashi H., Hayakawa A., Somaratne K. D. K. A., Okafor E. C. (2019) Science and Technology of Ammonia Combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37 (1), 109–133. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.029>.
  12. Pekhota A. N., Vostrova R. N., Griбанov V. N. (2020) Research of Thermal Engineering Properties of Briquettes Based on Sewage Sludge from Urban Wastewater Treatment Plants. *Nauchno-tekhnicheskii progress v zhilishchno-kommunal'nom khozyaistve: materialy II Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. T. 2 [Scientific and Technical Progress in Housing and Communal Services: Materials of the II International Scientific and Technical Conference. Vol. 2]*. Minsk: Institute of Housing and Communal Services of the National Academy of Sciences of Belarus, 99–108 (in Russian).
  13. Pekhota A. N. (2022) Study of Energy Characteristics of Multicomponent Solid Fuel Using Substandard Municipal and Industrial Waste Fuels. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 21 (2), 164–174. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-164-174> (in Russian).
  14. Khroustalev B. M., Pekhota A. N., Vostrova R. N., Pekhota E. A. (2022) Technology for Production of MSF-fuel – Direction Providing Transition to Circular Economy. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 21 (4), 340–348. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-340-348> (in Russian).
  15. Pekhota A. N., Khroustalev B. M. (2022) The Use of Hydrocarbon-Containing Waste in the Technology of Multicomponent Solid Fuel Briquetting. *Promyshlennaya Teploenergetika = Industrial Power Engineering*, (9), 53–61 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-516-529>

УДК 66.047.7

## Температура в процессе конвективной сушки тонких плоских влажных материалов

А. И. Ольшанский<sup>1)</sup>, А. А. Котов<sup>1)</sup>, С. М. Кузьменков<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Витебский государственный технологический университет  
(Витебск, Республика Беларусь)

**Реферат.** Изложены основные закономерности кинетики сушки тонких плоских материалов в период падающей скорости сушки. Приведены метод расчета среднеинтегральной температуры влажного материала на основе относительного температурного коэффициента сушки, обработка опытных данных на основе относительной скорости сушки в процессах сушки керамики, асбеста, шерстяной ткани. Предложена формула для расчета средней температуры. Приводится решение дифференциального уравнения теплопроводности для влажной пластины в процессе сушки в период падающей скорости при краевых условиях, учитывающих условия сушки, а также расчет коэффициента теплоотдачи. На основе изучения многих источников и обработки результатов экспериментов представлены формулы для вычисления коэффициента теплопроводности влажных материалов. Аналитическое решение задачи подтвердило, что при конвективной сушке в малоинтенсивных процессах второго периода сушки изменение температуры с уменьшением влагосодержания с экспоненциальной зависимости плавно переходит в линейную, что полностью согласуется с экспериментом. Представлено сопоставление значений температуры, полученных по экспериментальной формуле, с результатами аналитических решений. Получено достаточно надежное совпадение экспериментальных и расчетных аналитических значений температуры для периода падающей скорости сушки керамики, асбеста, ткани.

**Ключевые слова:** влагосодержание, температура, коэффициент сушки, скорость сушки, коэффициент теплообмена, температура мокрого термометра

**Для цитирования:** Ольшанский, А. И. Температура в процессе конвективной сушки тонких плоских влажных материалов / А. И. Ольшанский, А. А. Котов, С. М. Кузьменков // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 6. С. 516–529. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-516-529>

## Temperature During Convective Drying of Thin Flat Wet Materials

A. I. Ol'shanskii<sup>1)</sup>, A. A. Kotow<sup>1)</sup>, S. M. Kuzmenkov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Vitebsk State Technological University (Vitebsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The basic laws of the kinetics of drying thin flat materials during the period of drop in the drying speed are outlined. A method for calculating the average integral temperature of wet material on the basis of the relative temperature coefficient of drying is presented. Experimental

---

### Адрес для переписки

Ольшанский Анатолий Иосифович  
Витебский государственный  
технологический университет  
просп. Московский, 72,  
220035, г. Витебск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 29 112-79-25  
[tm@vstu.by](mailto:tm@vstu.by)

### Address for correspondence

Ol'shanskii Anatolii I.  
Vitebsk State  
Technological University  
72, Moskovsky Ave.,  
220035, Vitebsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 29 112-79-25  
[tm@vstu.by](mailto:tm@vstu.by)

---

data are processed based on the relative drying rate in the drying processes of ceramics, asbestos, and woolen fabric. A formula for calculating the average temperature is proposed. The solution of the differential equation of thermal conductivity for a wet plate during the drying process (namely during the period of drop in the drying speed) under boundary conditions taking into account the conditions of drying is given. The calculation of the heat transfer coefficient is given, too. Based on the study of various sources and processing of experimental results, formulas for calculating the thermal conductivity coefficient of wet materials have been presented. The analytical solution of the problem confirmed that during convective drying in low-intensity processes of the second drying period, the temperature change with a decrease in moisture content turns from an exponential dependence smoothly into a linear one, which is completely consistent with the experiment. A comparison of the temperature calculation by the experimental formula with the results of analytical solutions has been presented. A sufficiently reliable coincidence of experimental and calculated analytical values of temperature for the period of drop in speed drying of ceramics, asbestos, and fabric is obtained.

**Keywords:** moisture content, temperature, drying coefficient, drying rate, heat transfer coefficient, wet bulb temperature

**For citation:** Ol'shanskii A. I., Kotov A. A., Kuzmenkov S. M. (2024) Temperature During Convective Drying of Thin Flat Wet Materials. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (6), 516–529. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-516-529> (in Russian)

## Введение

Температура материала является важным параметром сушки, определяющим технологические качества готового продукта. Для определения температуры в периоде падающей скорости сушки необходимо знать зависимость между влагосодержанием влажного тела и временем сушки. Зависимость для определения температуры можно получить решением дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности, для чего необходимо знать достоверные зависимости коэффициентов теплопереноса от влагосодержания и температуры [1–4]. Но в большинстве случаев задача получается достаточно сложной в аналитическом отношении, так как она является существенно нелинейной [1–4]. Поэтому для практики сушки представляют интерес приближенные экспериментальные уравнения, полученные на основе обработки большого числа опытных данных [1–4]. Однако в связи с широким применением компьютерной техники и развитием численных методов решения дифференциальных уравнений становится возможным использовать результаты этих решений для расчета кинетики сушки [2, 3]. В малоинтенсивных процессах термической обработки влажных материалов, когда температура не претерпевает значительных изменений за малые промежутки времени, а коэффициенты теплопереноса являются функцией только влагосодержания, возникает возможность использовать результаты этих решений для расчета кинетики сушки конкретных влажных материалов [5–8].

Аналитические решения приобретают важное значение тогда, когда они согласуются с закономерностями, установленными экспериментальным путем. С этой целью необходимо проводить обработку опытных данных с согласованием полученных результатов с результатами аналитических решений.

### Кинетика сушки

Конвективная сушка тонких материалов проводилась нагретым воздухом с такими постоянными параметрами, как: температура  $t_c$ , °С, скорость движения  $v$ , м/с, относительная влажность  $\varphi$ , %. Сушимые тонкие материалы имеют большую удельную поверхность, так что перепады влагосодержания внутри материала и градиенты температуры малы. Режимы сушки тонких плоских тел в интервале температур воздуха  $t_c = 90\text{--}120$  °С и скорости  $v = 3\text{--}5$  м/с относятся к достаточно «мягким» режимам, без резких скачков температуры.

На рис. 1 представлены температурные кривые  $\bar{t} = f(\bar{u})$  в процессе сушки керамической пластины и листового асбеста при режиме сушки:  $t_c = 120$  °С,  $v = 5$  м/с,  $\varphi = 5$  %. На рис. 2 даны температурные кривые  $\bar{t} = f(\tau)$  в процессе сушки шерстяной ткани для режимов сушки:  $t_c = 65$  °С,  $v = 1$  м/с,  $\varphi = 10$  % (1) и  $t_c = 90$  °С,  $v = 5$  м/с,  $\varphi = 6$  % (2).

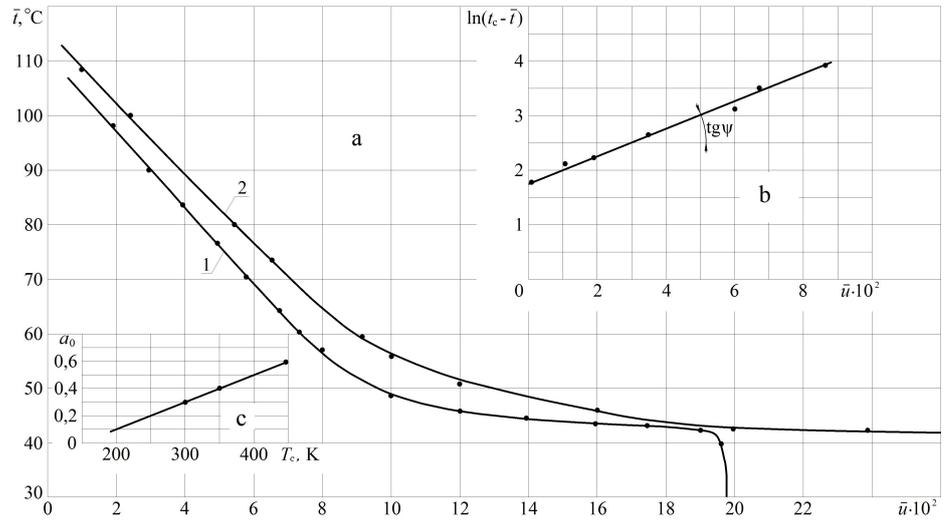


Рис. 1. Температурные кривые  $\bar{t} = f(\bar{u})$  (а) в процессе сушки керамической пластины (1) и листового асбеста (2) (режим сушки:  $t_c = 120$  °С,  $v = 5$  м/с,  $\varphi = 5$  %); зависимости  $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\bar{u})$  (б), коэффициента  $a_0 = f(T_c)$  (с) в процессе сушки керамической плитки (режим сушки:  $t_c = 90\text{--}120$  °С;  $v = 3\text{--}5$  м/с)

Fig. 1. Temperature curves  $\bar{t} = f(\bar{u})$  (a) during the drying of ceramic plate (1) and asbestos sheet (2) (drying mode:  $t_c = 120$  °С,  $v = 5$  м/с,  $\varphi = 5$  %) and the dependences  $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\bar{u})$  (b), coefficient  $a_0 = f(T_c)$  (c) in the process of drying ceramic tiles (drying modes:  $t_c = 90\text{--}120$  °С;  $v = 3\text{--}5$  м/с)

Характер протекания процесса сушки керамики, асбеста принципиально отличается от характера сушки тканей, материалов, сушка которых протекает только в периоде ее падающей скорости и без периода постоянной температуры [1, 3, 9].

В процессе сушки керамики и асбеста влагосодержание  $\bar{u}$  вначале уменьшается линейно до гигроскопического  $\bar{u}_{кр}$ . При влагосодержании  $\bar{u} < \bar{u}_{кр}$  начинается период падающей скорости сушки. Принято назы-

вать период постоянной скорости сушки первым, а период падающей скорости – вторым [2, 3]. Отличительной особенностью сушки таких капиллярно-пористых материалов является наличие и периода постоянной температуры на уровне температуры мокрого термометра  $t_m$  [1–4] (рис. 1). Кривая сушки  $\bar{u} = f(\tau)$  во втором периоде представляет экспоненциальную зависимость [1, 2]. При сушке тканей (рис. 2) температура увеличивается с начала сушки по экспоненциальному закону и с уменьшением влагосодержания  $\bar{u}$  плавно переходит в линейную зависимость. Такой же характер имеют температурные кривые  $\bar{t} = f(\bar{u})$  при сушке керамики и асбеста (рис. 1).

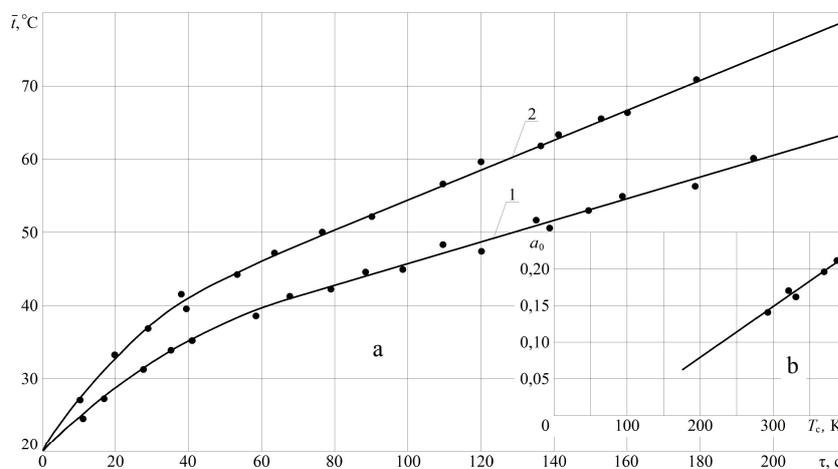


Рис. 2. Температурные кривые  $\bar{t} = f(\tau)$  (а) при сушке шерстяной ткани для двух режимов сушки:  $t_c = 65^\circ\text{C}$ ,  $v = 1$  м/с,  $\varphi = 10\%$  (кривая 1),  $t_c = 90^\circ\text{C}$ ,  $v = 5$  м/с,  $\varphi = 6\%$  (кривая 2); зависимость коэффициента  $a_0 = f(T_c)$  (б) для двух режимов сушки

Fig. 2. Temperature curves  $\bar{t} = f(\tau)$  (a) during drying of woolen fabric for two drying modes:  $t_c = 65^\circ\text{C}$ ,  $v = 1$  m/s,  $\varphi = 10\%$  (curve 1),  $t_c = 90^\circ\text{C}$ ,  $v = 5$  m/s,  $\varphi = 6\%$  (curve 2) and the dependence of the coefficient  $a_0 = f(T_c)$  (b) for two drying modes

Рассмотрим основные положения кинетики сушки, необходимые для расчета температуры в период ее падающей скорости. Относительная скорость сушки [1–5]

$$N^* = \frac{1}{N} \cdot \frac{d\bar{u}}{d\tau}, \quad (1)$$

где  $N$  – скорость сушки в первом периоде [1–4],

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = K(\bar{u} - u_p), \quad (2)$$

$K$  – коэффициент сушки;  $u_p$  – равновесное влагосодержание материала.

Величина  $N^*$  не зависит от режима сушки и является только функцией влагосодержания [1–3].

При сушке тканей относительная скорость сушки [1, 9]

$$N^* = \frac{1}{\left(\frac{d\bar{u}}{d\tau}\right)_{\max}} \cdot \frac{d\bar{u}}{d\tau} = \frac{1}{N_{\max}} \cdot \frac{d\bar{u}}{d\tau}, \quad (3)$$

где  $N_{\max}$  – максимальная скорость сушки.

Обработкой опытных данных сушки большого количества разных влажных материалов различными методами получена общая зависимость для ее относительной скорости [5]

$$\frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{\text{кр}}} = N^{*0,57}, \quad (4)$$

где  $\bar{\alpha}_{\text{кр}}$ ,  $\bar{\alpha}$  – коэффициенты теплоотдачи в первом и втором периодах сушки.

П. Д. Лебедевым [1–4] предложено изменение коэффициента теплоотдачи во втором периоде учитывать соотношением

$$\frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{\text{кр}}} = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}}\right)^n, \quad (5)$$

где  $n$  – постоянная, определяемая экспериментально.

При сушке тканей

$$\frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{\max}} = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_0}\right)^n,$$

где  $\bar{\alpha}_{\max}$  – максимальное значение коэффициента теплоотдачи в начальный момент сушки;  $\bar{u}_0$  – начальное влагосодержание материала.

Для керамики, асбеста, войлока постоянная  $n = 0,5$ , для сукна и тканей  $n = 0,42$  [1, 5, 9]. На основании (4) и (5) для относительной скорости сушки можно записать

$$N^* = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}}\right)^{\frac{n}{0,57}}.$$

Для керамики и асбеста имеем

$$N^* = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}}\right)^{0,88}, \quad (6)$$

для тканей

$$N^* = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}}\right)^{0,74}. \quad (7)$$

В. В. Красников [2] на основе анализа обобщенных кривых и скорости сушки получил уравнение для ее скорости

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = N \cdot N^*. \quad (8)$$

Из него следует, что скорость сушки в период падающей скорости можно определить по величинам  $N$  и  $N^*$  для заданного влагосодержания  $\bar{u}$  [1–6].

Из уравнений (2) и (8) коэффициент сушки  $K$  равен

$$K = \frac{N \cdot N^*}{\bar{u} - u_p} = \frac{N \cdot (\bar{u}/\bar{u}_{кр})^{0,88}}{\bar{u} - u_p}. \quad (9)$$

Для сушки тканей

$$K = \frac{N_{\text{макс}} \cdot (\bar{u}/\bar{u}_0)^{0,74}}{\bar{u} - u_p}. \quad (10)$$

Следовательно, коэффициент сушки  $K$  во втором периоде величина переменная.

Для расчета средней температуры материала во втором периоде сушки А. В. Лыковым [1, 5, 7, 8] был введен в кинетику сушки относительный температурный коэффициент сушки:

$$B = \frac{d\bar{t}}{d\bar{u}} \frac{\Delta\bar{u}}{\Delta t}; \quad \frac{d\bar{t}}{\Delta t} = B \frac{d\bar{u}}{\Delta\bar{u}}, \quad (11)$$

где  $\Delta\bar{u}$  и  $\Delta t$  – фиксированные значения влагосодержания и температуры;  $d\bar{t}/d\bar{u} = b$  – температурный коэффициент сушки, определяемый графическим дифференцированием температурной кривой  $\bar{t} = f(\bar{u})$ .

Относительный температурный коэффициент сушки  $B$  является наиболее общей характеристикой процесса, определяющей закономерности изменения температуры во втором периоде [1–3].

Для большого ряда капиллярно-пористых материалов зависимость  $B = f(\bar{u})$  выражается эмпирической формулой [1, 2, 5, 7, 8]

$$B = a_0 \exp(-m(\bar{u} - u_p)). \quad (12)$$

Постоянные  $a_0$  и  $m$  определяются экспериментально.

Для случая конвективной сушки за фиксированные значения  $\Delta\bar{u}$  и  $\Delta t$  удобно принять:  $\Delta\bar{u} = \bar{u}_{кр}$ ,  $\Delta t = T_c$ , где  $T_c$  – абсолютная температура среды [1, 2, 5, 7, 8]. Подставляя в (11) уравнение (12) и интегрируя, получим уравнение температурной кривой

$$\bar{t} = t_c - \frac{a_0 T_c}{m \bar{u}_{кр}} \left( 1 - \exp(-m(\bar{u} - u_p)) \right). \tag{13}$$

Для материалов, сушка которых протекает в период ее падающей скорости без периода постоянной температуры с непрерывным повышением температуры, постоянная  $m$  меняет свой знак на противоположный и уравнение принимает вид [7–9]

$$\bar{t} = t_c - \frac{a_0 T_c}{m \bar{u}_0} \left( \exp(m(\bar{u} - u_p)) - 1 \right). \tag{14}$$

Коэффициент  $a_0$  является линейной функцией абсолютной температуры. Постоянная  $m$  находится построением графической зависимости  $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\bar{u})$ . Если отложить по оси ординат величину  $\ln(t_c - \bar{t})$ , а по оси абсцисс – влагосодержание  $\bar{u}$ , то получим прямую, тангенс угла наклона которой к оси  $\bar{u}$  равен величине постоянной  $m$  [1, 8]:

$$\text{tg}\varphi = \frac{\ln(t_c - \bar{t}_1) - \ln(t_c - \bar{t}_2)}{\bar{u}_1 - \bar{u}_2} = m.$$

На рис. 1b изображена такая зависимость для процесса сушки керамической пластины, а на рис. 1с и 2b даны линейные зависимости для коэффициента  $a_0$  в процессах сушки керамики и тканей. Значения  $m$  и  $a_0$  для некоторых материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Значения постоянных  $m$  и  $a_0$  при влагосодержаниях  $\bar{u}_0, \bar{u}_{кр}$  и режимов сушки керамики, асбеста, войлока, картона и шерстяной ткани**

**The values of constants  $m$  and  $a_0$  at moisture contents of  $\bar{u}_0, \bar{u}_{кр}$  and drying modes of ceramics, asbestos, felt, cardboard and woolen fabric**

Материал	$\bar{u}_0$	$\bar{u}_{кр}$	Режим сушки			$m$	$a_0$
			$t_c, ^\circ\text{C}$	$v, \text{ м/с}$	$\varphi, \%$		
Керамическая плитка, $\delta = 5 \text{ мм}$	0,2–0,24	0,1–0,12	90–120	3–5	4	35	$3,9 \cdot 10^{-3} \cdot T_c - 1$
Листовой асбест, $\delta = 6 \text{ мм}$	0,46–0,48	0,2–0,22	90–120	3–5	5	22	$6,4 \cdot 10^{-3} \cdot T_c - 1,8$
Шерстяной войлок, $\delta = 8 \text{ мм}$	1,14–1,16	0,71–0,75	90–150	3–5	5	12	$2,85 \cdot 10^{-3} \cdot T_c - 0,7$
Технический картон, $\delta = 4,5 \text{ мм}$	0,75–0,78	0,5–0,55	90–110	3–5	6	-1,8	$0,415 \cdot 10^{-3} \cdot T_c - 0,1$
Шерстяная ткань, $\delta = 0,6–0,8 \text{ мм}$	1,12–1,14	–	65–90	2–5	6	-0,2	$1,1 \cdot 10^{-3} \cdot T_c - 0,17$

Из уравнений (13) и (14) следует, что средняя температура материала от влагосодержания изменяется по закону экспоненты. Если разложить в ряд  $\exp(-m(\bar{u} - u_p))$  и ограничиться первыми членами ряда, то с уменьшением влагосодержания экспоненциальная зависимость переходит в линей-

ную [1]. При этом температурные коэффициенты сушки  $b = d\bar{t}/d\bar{u} = \text{const}$  и  $B = b \cdot \bar{u}_{\text{кр}}/T_c = \text{const}$ , а коэффициент  $a_0 = B$  [1, 2]. Тогда линейное уравнение температурной кривой будет иметь вид [10, 11]

$$\bar{t} = t_c - \frac{BT_c}{\bar{u}_{\text{кр}}}(\bar{u} - u_p). \quad (15)$$

Обозначим комплекс  $BT_c/\bar{u}_{\text{кр}}$  через  $b_0$  и запишем [11]

$$\bar{t} = t_c - b_0(\bar{u} - u_p). \quad (16)$$

А. В. Лыков на основе изучения многих процессов сушки различных капиллярно-пористых материалов считает, что зависимость между средней температурой  $\bar{t}$  и влагосодержанием  $\bar{u}$  может быть линейной [1, 10, 11, 12] и выражаться формулой (16). Например, для такого типичного капиллярно-пористого тела, как пористая керамика, при сушке в режимах при:  $t_c = 60$  °С,  $\varphi = 10$  % и  $t_c = 80$  °С,  $\varphi = 6$  % и скорости воздуха  $v \approx 0,5-0,8$  м/с, В. П. Журавлева показала, что в периоде падающей скорости сушки зависимости между средней температурой и влагосодержанием являются линейными [1, 13], а температурный коэффициент сушки  $b = d\bar{t}/d\bar{u} = \text{const}$ .

Из рис. 1 и 2 при сушке керамической пластины, листового асбеста и ткани видно, что зависимости  $\bar{t} = f(\bar{u})$  и  $\bar{t} = f(\tau)$  с уменьшением  $\bar{u}$  становятся линейными.

Сушка тканей имеет свои особенности. В отличие от большинства других тонких материалов сушка происходит сразу в период падающей скорости от начального влагосодержания  $\bar{u}_0$  и без периода постоянной температуры [8]. Ткани на сушку подаются после механического отжима с влагосодержанием  $\bar{u}_0 \approx 1,1-1,3$ . При сушке тканей, как очень тонких материалов (толщина  $\delta \approx 0,4-1,6$  мм), расход теплоты на нагревание влажного тела намного меньше расхода теплоты на испарение из него влаги [1, 9].

Для использования формулы (15) при расчете средней температуры необходимо знать относительный температурный коэффициент сушки  $B$ . В области линейной зависимости  $\bar{t} = f(\bar{u})$  коэффициент  $B = \text{const}$ . Коэффициент  $B$  в процессе сушки керамической пластины ( $t_c = 120$  °С,  $v = 5$  м/с) для области влагосодержаний  $\bar{u} \approx 0,06-0,025$  по формуле (12) дает значение  $B \approx 0,21$ , по экспериментальным данным [7, 8]  $B = 0,214$ . Параметр  $b_0^{\text{экс}} \approx BT_c/\bar{u}_{\text{кр}} \approx 840$  К. Точность определения параметра  $b_0^{\text{экс}}$  зависит от погрешности графического дифференцирования температурной кривой  $\bar{t} = f(\bar{u})$ .

По данным В. П. Журавлевой [13], при сушке керамической плитки толщиной  $\delta \approx 6$  мм получены следующие значения для  $B$  при скорости воздуха  $v = 4$  м/с:

- 1)  $t_c = 100$  °С,  $B \approx 0,08$ ;
- 2)  $t_c = 150$  °С,  $B \approx 0,11$ ;
- 3)  $t_c = 200$  °С,  $B \approx 0,23$ .

Полученные В. П. Журавлевой значения коэффициента  $B$  согласуются со значениями опытных данных в работах [14–16].

А. В. Лыковым из решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности для неограниченной пластины получено уравнение для параметра  $b_0$  [11, 12].

Уравнение теплопроводности:

при  $\tau = 0$ ;  $t = t_M$

$$\frac{\partial \bar{t}}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}; \quad (17)$$

при  $x = \pm R$

$$\frac{\partial t}{\partial x} - \frac{\bar{\alpha}}{\lambda_{\text{вл.}}} (t_c - \bar{t}) - \frac{\rho r R}{\lambda_{\text{вл.}}} \cdot \frac{d\bar{u}}{d\tau} = 0, \quad (18)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $\bar{\alpha}$  – то же теплоотдачи;  $\lambda_{\text{вл.}}$  – то же теплопроводности влажного тела;  $R$  – половина толщины пластины;  $\rho$  – плотность материала;  $r$  – теплота парообразования.

Для тонких материалов скорость сушки – экспоненциальная функция времени

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} = K(\bar{u} - u_p). \quad (19)$$

Интегрирование (19) для периода падающей скорости сушки

$$\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{\text{кр}} - u_p} = \exp(-K \tau_{\text{II}}), \quad (20)$$

где  $\bar{u}_{\text{кр}}$  – критическое влагосодержание при переходе первого периода сушки во второй;  $\tau_{\text{II}}$  – время сушки во втором периоде, отсчитываемое от нуля.

Решением дифференциального уравнения с заданными краевыми условиями, учитывающим скорость сушки в периоде падающей скорости, методом разделения переменных для средней температуры получено уравнение [11]

$$\bar{t} = t_c - \frac{rRK\rho}{\bar{\alpha} - Kc_{\text{вл.}}\rho R} (\bar{u} - u_p). \quad (21)$$

Обозначим через  $b_0$  часть уравнения (21)

$$b_0 = \frac{rRK\rho}{\bar{\alpha} - Kc_{\text{вл.}}\rho R}, \quad (22)$$

где  $c_{\text{вл.}}$  – удельная теплоемкость влажного тела.

Выражение для параметра  $b_0$  можно упростить, если знаменатель в (22) умножим и разделим на  $c_{\text{вл}}\rho R$ . В результате получим

$$b_0 = \frac{rK}{c_{\text{вл}}(Z - K)}. \quad (23)$$

Вычислим параметр  $Z$  [11]

$$Z = \frac{\bar{\alpha}}{c_{\text{вл}}\rho R}. \quad (24)$$

Комплекс  $Z$  определяет интенсивность теплообмена при взаимодействии поверхности пластины с окружающей средой.

Уравнение температурной кривой запишем в виде

$$\bar{t} = t_c - \frac{rK}{c_{\text{вл}}(Z - K)}(\bar{u} - u_p). \quad (25)$$

Уравнение (25) с учетом выражения (22) приводит к виду (16). Средняя температура  $\bar{t}$  во втором периоде с уменьшением влагосодержания представляет линейную зависимость  $\bar{t} = f(\bar{u})$ . Решение справедливо в случае, если параметр  $Z > K$  [11].

Коэффициент теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  определяется по формуле для теплообменного критерия Нуссельта [1, 3, 7]

$$\text{Nu} = C \cdot \text{Re}^{0,5} \cdot \left(\frac{T_c}{T_m}\right)^2 \cdot \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}}\right)^n, \quad (26)$$

где  $\text{Re}$  – число Рейнольдса;  $T_c$ ,  $T_m$  – абсолютные температуры среды и мокрого термометра; коэффициент  $C$  принимает значения:  $C = 0,75$  – для керамики,  $C = 0,70$  – для асбеста,  $C = 0,89$  – для тканей; коэффициент  $n = 0,5$  – для керамики и асбеста,  $n = 0,42$  – для тканей.

Коэффициент теплоотдачи определяется выражением

$$\bar{\alpha} \approx \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{\text{воз}}}{l}, \quad (27)$$

где  $\lambda_{\text{воз}}$  – коэффициент теплопроводности воздуха по таблицам [2];  $l$  – длина образца материала по направлению набегания потока воздуха.

При сушке влажных материалов влагосодержание уменьшается, а температура увеличивается, поэтому все теплофизические коэффициенты изменяются. Наибольшее изменение претерпевает коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{вл}}$ . Коэффициент температуропроводности  $a$  изменяется мало, так как со снижением  $\lambda_{\text{вл}}$  одновременно уменьшается произведение  $c_{\text{вл}} \cdot \rho$ , приблизительно с такой же скоростью [10, 11]. Средняя удельная теплоемкость  $c_{\text{вл}}$  зависит от влагосодержания материала и незначительно от температуры

$$c_{\text{вл.}} \approx c_0 + c_{\text{в}} \cdot \bar{u},$$

где  $c_0$  – удельная теплоемкость сухого тела;  $c_{\text{в}}$  – теплоемкость воды.

Коэффициенты теплопроводности сухих материалов  $\lambda_0$  почти не зависят от температуры в области от 30 до 90 °С [1–3].

Коэффициенты теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  в периоде падающей скорости сушки, определяемые по формуле (26), полученной из теории подобия на основе эксперимента, отражают приближенные значения  $\bar{\alpha}$ . Поэтому и очень важный параметр  $Z$  также определяется приближенно.

Обработкой опытных данных по коэффициенту  $\lambda_{\text{вл}}$  для керамики и асбеста по формуле В. И. Дубницкова, на основе изучения источников [1, 10, 13, 17–19] получена формула

$$\lambda_{\text{вл.}} = \lambda_0 + A_0 \bar{t} \cdot \bar{u} \exp(-B_0 \bar{u}), \quad (28)$$

где коэффициенты  $A_0$ ,  $B_0$  определяются опытным путем; для керамики:  $A_0 = 0,075$ ,  $B_0 = 2$ ,  $\lambda_0 = 0,8$  Вт/м·°С; для асбеста:  $A_0 = 0,03$ ,  $B_0 = 2$ ,  $\lambda_0 = 0,12$  Вт/м·°С.

Коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{вл}}$  для шерстяных тканей и шерстяного строительного войлока практически не зависит от температуры до  $t \approx 90$  °С. Зависимость  $\lambda_{\text{вл}}$  для шерстяных тканей и войлока от влагосодержания хорошо изучена [17, 20] и приближенно выражается соотношением

$$\lambda_{\text{вл.}} \approx \lambda_0 + \left( \frac{d\lambda}{dW} \right) W,$$

где  $W$  – влагосодержание, %.

Отношение  $d\lambda/dW$  характеризует прирост коэффициента теплопроводности на каждый 1 % прироста влажности. В сушильной практике принята связь  $\bar{u} = 0,01W$ . Для шерстяных тканей и войлока ( $\rho = 150\text{--}350$  кг/м<sup>3</sup>) величина  $d\lambda/dW$  приближенно составляет 0,0029–0,0046 и с погрешностью не более чем в 5 % определяется по формуле [20]

$$\lambda_{\text{вл.}} = \lambda_0 + 0,004W. \quad (29)$$

Значения средних температур для процессов сушки керамической плитки, листового асбеста и шерстяной ткани, вычисленных по экспериментальным формулам (13), (15) и по аналитической (25), даны в табл. 2. По формуле (15) расчет температуры был проведен при  $\bar{u} < \bar{u}_{\text{кр}}$ , принимая линейную зависимость средней температуры  $\bar{t}$  от влагосодержания  $\bar{u}$ . Анализ полученных расчетных значений температур по всем формулам дает погрешность 5–8 %. Следовательно, температурную кривую  $\bar{t} = f(\bar{u})$  во втором периоде нет необходимости делить на две зоны. В общем случае для капиллярно-пористых материалов температурная кривая представляет пологую экспоненту, плавно переходящую при уменьшении влагосодержания в линейную зависимость.

Таблица 2

Значения средних температур, вычисленных по формулам (13), (15), (25), и комплекса в уравнении (25) для сушки керамики, листового асбеста и шерстяной ткани

The values of average temperatures calculated by the formulas (13), (15), (25) and the complex in equation (25) for drying ceramics, asbestos sheets and woolen fabric

Керамическая плитка: $120 \times 80 \times 5$ мм; $\rho = 1840$ кг/м <sup>3</sup> ; $\lambda_0 = 0,8$ Вт/(м·°С); $c_0 = 860$ Дж/кг·°С; $\bar{u}_0 = 0,2$ ; $\bar{u}_{кр} = 0,1$ ; $u_p = 0$ . Режим сушки: $t_c = 120$ °С; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %; $t_m = 50$ °С; $N = 0,0185$ мин <sup>-1</sup>										
$\bar{u}$	$\bar{\alpha}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С) (26)	$\lambda_{вд}$ , Вт/(м·°С) (28)	$N^*$ (6)	$Z$ , мин <sup>-1</sup> (24)	$K$ , мин <sup>-1</sup> (9)	$b_0$ , °С (23)	$\bar{t}$ , °С экс	$\bar{t}$ , °С (13)	$\bar{t}$ , °С (15)	$\bar{t}$ , °С (25)
0,08	63,5	0,79	0,82	0,69	0,184	870	60	62	55	53
0,07	55,4	0,75	0,73	0,62	0,185	860	65	65	62	60
0,06	46,4	0,72	0,64	0,67	0,192	870	72	69	70	69
0,05	41,6	0,68	0,54	0,65	0,200	870	80	77	78	77
0,04	38,4	0,64	0,45	0,68	0,210	880	85	82	87	85
0,03	30,8	0,60	0,36	0,67	0,215	880	98	94	96	95
0,02	23,6	0,57	0,24	0,68	0,220	890	100	100	103	102
Листовой асбест: $120 \times 80 \times 6$ мм; $\rho = 770$ кг/м <sup>3</sup> ; $\lambda_0 = 0,123$ Вт/м·°С; $c_0 = 825$ Дж/кг·°С; $\bar{u}_0 = 0,46$ ; $\bar{u}_{кр} = 0,20$ ; $u_p = 0$ . Режим сушки: $t_c = 120$ °С; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %; $t_m = 42$ °С; $N = 0,028$ мин <sup>-1</sup>										
0,16	36,2	0,328	0,82	0,61	0,140	450	52	54	54	54
0,14	33,3	0,289	0,73	0,60	0,140	470	57	57	57	55
0,10	31,6	0,252	0,54	0,71	0,150	510	65	62	65	64
0,08	28,4	0,212	0,45	0,69	0,155	550	72	70	78	72
0,04	20,8	0,174	0,24	0,78	0,165	600	86	84	–	89
0,02	18,6	0,135	0,14	0,80	0,180	680	100	99	–	104
Шерстяная ткань: $\delta = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м; $\rho = 200$ кг/м <sup>3</sup> ; $\lambda_0 = 0,046$ Вт/м·°С; $c_0 = 1300$ Дж/кг·°С; $\bar{u}_0 = 1,12$ ; $u_p = 0,002$ . Режим сушки: $t_c = 90$ °С; $v = 5$ м/с; $\varphi = 6$ %; $N_{\max} = 0,016$ с <sup>-1</sup>										
$\bar{u}$	$\bar{\alpha}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С) (26)	$\lambda_{вд}$ , Вт/(м·°С) (28)	$N^*$ (7)	$Z$ , с <sup>-1</sup> (24)	$K$ , с <sup>-1</sup> (9)	$b_0$ , °С (23)	$\bar{t}$ , °С экс	$\bar{t}$ , °С (14)	$\bar{t}$ , °С (16)	$\bar{t}$ , °С (25)
0,7	32,7	0,328	0,72	0,120	0,016	90	34	34	32	30
0,6	30,8	0,289	0,65	0,131	0,017	94	38	37	36	35
0,5	26,4	0,252	0,57	0,127	0,018	96	45	44	42	42
0,4	25,4	0,212	0,50	0,168	0,020	98	48	52	49	51
0,3	23,5	0,175	0,39	0,220	0,021	99	56	61	58	59
0,2	22,4	0,142	0,29	0,260	0,022	110	67	71	68	67

## ВЫВОДЫ

1. Рассмотренные закономерности изменения температуры в периоде падающей скорости сушки показали, что температурная кривая в этом периоде представляет сложную экспоненциальную зависимость, переходя-

щую при уменьшении влагосодержания в пологую экспоненту, близкую к линейной. Аналитическое решение задачи подтверждает закономерности изменения температуры, установленные опытным путем.

2. Аналитические решения совместно с экспериментальными методами имеют актуальное значение, когда они подтверждают опытные данные. Такие совместные исследования сближают теорию с практикой сушки.

#### 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: Бел. наука, 2010. 443 с.
4. Рудобашта, С. П. Массотеплоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. М.: Химия, 1980. 248 с.
5. 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.
6. Васильев, В. Н. Технология сушки. Основы тепло- и массопереноса / В. Н. Васильев, В. Е. Куцакова, С. В. Фролов. СПб.: ГИОРД, 2013. 224 с.
7. Ольшанский, А. И. Кинетика теплообмена и экспериментальные методы расчета температуры материала в процессе сушки / А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 2013. Т. 86, № 3. С. 584–594.
8. Куц, П. С. К вопросу приближенной методики расчета кинетики конвективной сушки плоских материалов / П. С. Куц, А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 1975. Т. 28, № 4. С. 594–598.
9. 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>.
10. Лыков, А. В. Теоретические основы строительной теплофизики / А. В. Лыков. Минск: Изд. АН БССР, 1961. 519 с.
11. Лыков, А. В. Теория сушки капиллярно-пористых коллоидных материалов пищевой промышленности / А. В. Лыков, Л. Я. Ауэрман. М.: Пищепромиздат, 1946. 286 с.
12. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. М.: Высш. шк., 1967. 600 с.
13. Журавлева, В. П. Массотеплоперенос при термообработке и сушке капиллярно-пористых строительных материалов / В. П. Журавлева. Минск: Наука и техника, 1972. 192 с.
14. Ольшанский, А. И. Аналитический расчет температуры в процессе сушки тонких капиллярно-пористых плоских материалов / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2018. Т. 63, № 3. С. 333–341. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-333-341>.
15. Ольшанский, А. И. Температура материала в процессе конвективной сушки тонких материалов в периоде падающей скорости сушки / А. И. Ольшанский, А. М. Гусаров // Инженерно-физический журнал. 2020. Т. 93, № 2. С. 378–383.
16. 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>.
17. Франчук, А. У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов / А. У. Франчук. М.: НИИ строительной физики, 1969. 143 с.
18. Блази, В. Строительная физика: справ. проектировщика. М.: Техносфера, 2005. 536 с.
19. Физические величины / под ред. И. С. Григорьева, Е. Х. Мейсхова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
20. Колесников, П. А. Теплозащитные свойства одежды / П. А. Колесников. М.: Легкая индустрия, 1965. 337 с.

REFERENCES

1. Lykov A. V. (1968) *Drying Theory*. 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. Rudobashta S. P. (1980) *Mass-and-Heat Transfer in Solid-Phase Systems*. Moscow, Khimiya Publ. 248 (in Russian).
5. Lykov A. V., Kuts P. S., Ol'shanskii A. I. (1972) Kinetics of Heat Transfer during the Desiccation of Moist Materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 23, 1082–1086. <https://doi.org/10.1007/BF00832214>.
6. Vasilyev V. N., Kutsakova V. E., Frolov S. V. (2013) *Drying Technology. Basics of Heat and Mass Transfer*. Saint-Petersburg, Giord Publ. 224 (in Russian).
7. Ol'shanskii A. I. (2013) Heat Transfer Kinetics and Experimental Methods for Calculating the Material Temperature in the Drying Process. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 86, 622–633. <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0876-1>.
8. Kuts P. S., Ol'shanskii A. I. (1975) Approximate Method of Calculating the Kinetics of Convective Drying of Flat Materials. *Journal of Engineering Physics*, 28 (4), 419–422. <https://doi.org/10.1007/bf00878212>.
9. Ol'shanskii A. I., Golubev A. N. (2023) Investigation of the Kinetics of Heat and Moisture Exchange during Heat Treatment and Drying of Thin Wet Thermal Insulation Materials. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (1), 66–79. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-66-79> (in Russian).
10. Lykov A. V. (1961) *Theoretical Foundations of Construction Thermophysics*. Minsk, AN BSSR Publ. 519 (in Russian).
11. Lykov A. V. (1946) *Theory of Drying Capillary-Porous Colloidal Materials of the Food Industry*. Moscow, Pishchepromizdat Publ. 286 (in Russian).
12. Lykov A. V. (1967) *Theory of Thermal Conductivity*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 600 (in Russian).
13. Zhuravleva V. P. (1972) *Mass Transfer in the Course of Heat Treatment and Drying of Capillary-Porous Building Materials*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ. 192 (in Russian).
14. Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V., Gusarov A. M. (2018) Calculation of the Kinetics of Heat Transfer Using the Experimental Data of Moisture Exchange in the Process of Convective Drying of Thin Flat Materials. *Vesti Natsyonal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, 63 (3), 333–341. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-333-341> (in Russian).
15. Ol'shanskii A. I., Gusarov A. M. (2020) Temperature of Material in the Process of Convective Drying of Thin Materials in the Falling Rate Period of Drying. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 93, 364–368. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02129-0>.
16. 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).
17. Franchuk A. U. (1969) *Tables of Thermal Performance of Construction Materials*. Moscow, Research Institute of Construction Physics Publ. 143 pp. (in Russian).
18. Blazi V. (2005) *Construction Physics: Designer's Handbook*. Moscow, Tekhnosfera Publ. 536 (in Russian).
19. Grigoriev I. S., Meimekhov E. Kh. (eds.) (1991) *Physical Quantities*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1232 (in Russian).
20. Kolesnikov P. A. (1965) *Thermal Protection Properties of Clothing*. Moscow, Legkaya Industriya Publ. 337 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-530-543>

УДК 621.313

## **Обоснование использования биогаза для производства энергии в Республике Беларусь**

**Е. В. Зеленухо<sup>1)</sup>, А. А. Цыганова<sup>1)</sup>, Г. В. Бельская<sup>1)</sup>, А. А. Хрипович<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

**Реферат.** Развитие биогазовых технологий в Республике Беларусь происходит в рамках энергетического строительства и формирования сырьевой базы, что определяется особенностями экономического развития. В настоящее время биогаз получают по двум основным технологиям сбраживания отходов – с использованием влажной технологии переработки органических отходов животноводства и сухой технологии конверсии твердых бытовых отходов. К первой категории можно отнести 16 биогазовых заводов общей мощностью 21,219 МВт, основным сырьем для которых являются органические отходы животноводства, отличающиеся высокой влажностью. Главным оборудованием на этих заводах являются биореакторы. Ко второй категории биогазовых комплексов можно отнести 21 биогазовую установку с газопоршневыми агрегатами общей установленной мощностью 32,463 МВт. Основным сырьем для них являются твердые бытовые отходы, из которых производят свалочный газ. Дополнительное оборудование – когенерационные установки – в обеих технологиях позволяет повысить энергоэффективность выработки биогаза. По результатам оценки теоретического и технически возможного потенциала биогаза из отходов животноводства при сохранении численности поголовья скота в сельскохозяйственных организациях на уровне начала 2023 г. имеется возможность ежегодного замещения в топливном балансе республики 1325 и 982 млн м<sup>3</sup> природного газа соответственно. В последние несколько лет появилась настоятельная потребность переориентации производственной деятельности биогазовых комплексов вследствие ввода в строй Белорусской АЭС. Изменение энергетической структуры страны внесло существенные коррективы в функционирование альтернативной энергетики, включая производство биогаза, в первую очередь по его целевым показателям. Вопросы производства альтернативной энергии в новых условиях остаются актуальными, поскольку электрическую и тепловую энергию, произведенную из биогаза, можно и следует использовать для функционирования оборудования, подогрева воды, обезвоживания получаемого биогумуса, других локальных целей. Остаются высокоактуальными экологические преимущества биогазовых технологий – эффективное управление органическими отходами крупных животноводческих ферм, которое позволяет существенно снизить загрязнение почв, поверхностных и грунтовых вод, атмосферного воздуха органическими загрязнителями вблизи животноводческих комплексов. В Республике Беларусь возникла необходимость изменения производственной деятельности биогазовых комплексов,

---

### **Адрес для переписки**

Цыганова Анна Александровна  
Белорусский национальный  
технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-91-29  
[cyganovaaa@bntu.by](mailto:cyganovaaa@bntu.by)

### **Address for correspondence**

Tsyhanava Hanna A.  
Belarusian National  
Technical University  
65 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-91-29  
[cyganovaaa@bntu.by](mailto:cyganovaaa@bntu.by)

---

что обусловлено в первую очередь появлением в энергобалансе страны атомной энергии, вырабатываемой на Белорусской АЭС.

**Ключевые слова:** биогаз, производство энергии, возобновляемые источники энергии, сухая и влажная ферментация, теплотворная способность, переориентация производственной деятельности

**Для цитирования:** Обоснование использования биогаза для производства энергии в Республике Беларусь / Е. В. Зеленуха [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 6. С. 530–543. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-530-543>

## Justification of the Use of Biogas for Power Generation in the Republic of Belarus

A. V. Zelianukha, H. A. Tsyhanava, H. V. Belskaya, H. A. Khrypovich

<sup>1)</sup>Belarussian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The development of biogas technologies in the Republic of Belarus takes place within the framework of power construction and the formation of a raw material base, which is determined by the peculiarities of economic development. Currently, biogas is produced using two main waste fermentation technologies: wet technology for processing organic livestock waste and dry technology for converting solid household waste. The first category includes 16 biogas plants with a total capacity of 21.219 MW, the main raw materials for which are organic waste from animal husbandry, characterized by high humidity. The main equipment used in these plants are bioreactors. The second category of biogas complexes includes 21 biogas plants with gas piston units with a total installed capacity of 32.463 MW. Their main raw material for them is household solid waste, from which landfill gas is produced. Additional equipment, viz. cogeneration plants in both technologies makes it possible to increase the power efficiency of biogas production. According to the results of the assessment of the theoretical and technically possible potential of biogas from livestock waste while maintaining the number of livestock in agricultural organizations at the level of the beginning of 2023, there is a possibility of annual replacement of 1,325 million m<sup>3</sup> and 982 million m<sup>3</sup> of natural gas in the fuel balance of our country, respectively. In the last few years, there has been an urgent need to reorient the production activities of biogas complexes due to the commissioning of the Belarusian nuclear power plant. The change in the country's energy structure has made significant adjustments to the functioning of alternative power engineering, including the production of biogas, primarily according to its target indicators. The issues of alternative energy production in the new conditions remain significant, since electric and thermal energy produced from biogas can and should be used for the operation of equipment, water heating, dehydration of the resulting vermicompost, and other local purposes. The environmental advantages of biogas technologies remain highly relevant, i.e., effective management of organic waste from large livestock farms, which can significantly reduce pollution of soils, surface and groundwater, atmospheric air with organic pollutants, near livestock complexes. In the Republic of Belarus, there is now a need to change the production activities of biogas complexes, primarily due to the appearance of nuclear power produced at the Belarusian nuclear power plant in the country's energy balance.

**Key words:** biogas, power production, renewable energy, dry and wet fermentation, calorific capacity, reorientation of production activities

**For citation:** Zelianukha A. V., Tsyhanava H. A., Belskaya H. V., Khrypovich H. A. (2024) Justification of the Use of Biogas for Power Generation in the Republic of Belarus. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (6), 530–543. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-530-543> (in Russian)

## **Введение**

Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 г. [1] определяет развитие топливно-энергетического комплекса путем включения в энергетический баланс ядерного топлива и возобновляемых источников энергии. В этом направлении достигнут определенный прогресс. Так, в 2022 г. целевой показатель потребления местных топливно-энергетических ресурсов (без учета атомной энергии) выполнен и составил 16,5 % от общего количества потребляемой энергии, в том числе 7,4 % приходится на долю вторичных энергетических ресурсов. В соответствии с Государственной программой «Энергосбережение» на 2021–2025 гг. [2] планируется дальнейшее увеличение использования местных топливно-энергетических ресурсов, в том числе из возобновляемых источников.

Одним из главных направлений развития вторичных энергетических ресурсов в нашей стране является производство нетрадиционного вида топлива – биогаза, потребление которого за последнее десятилетие возросло в 5 раз [2]. Ресурсный потенциал биогаза составляет 3,265 млн т у. т. в год, уступая потенциалу только солнечной энергии [3] и превышая этот показатель для древесного топлива, отходов деревообработки (3,1 млн т у. т.), отходов растениеводства (1,46 млн т у. т. в год) и потенциала ветра (0,672 млн т у. т. в год) [4].

Современные технологии производства вторичных энергетических ресурсов в стране отвечают необходимым требованиям по генерации и потреблению энергии, что обеспечивает процессы оптимизации топливно-энергетического баланса и поэтапной декарбонизации энергетического сектора, в строгом соответствии с международной деятельностью по замедлению глобального потепления климата. Биогаз как вторичный энергетический ресурс имеет несомненные преимущества перед другими источниками, ввиду того что его потребление не требует специальной инфраструктуры, а следовательно, дополнительных затрат, обладая при этом всеми признаками эффективной экологичной технологии переработки отходов.

Важным резервом повышения энергоэффективности является целевое использование биогаза с учетом сложившихся эколого-экономических условий развития республики. После ввода в эксплуатацию Белорусской АЭС в 2021–2025 гг. биогазовые технологии будут развиваться в основном для удовлетворения собственных локальных нужд, например обслуживания самих биогазовых установок [2], использования тепловой энергии для получения дополнительного продукта биогазовых технологий – биогумуса, газификации жилищного сектора сельских регионов, в качестве автомобильного топлива, в первую очередь для общественного транспорта, и других целей.

## **Основная часть**

Производство биогаза является отраслью циркулярной (зеленой) экономики, поскольку исходным сырьем для процессов метаногенеза являют-

ся промышленные, сельскохозяйственные и отходы жилищно-коммунального хозяйства, содержащие органическую фракцию, которая подвергается ферментации. Известно, что первые биогазовые заводы в европейских странах были построены в 60-е гг. XX ст. исключительно для утилизации органических отходов жилищно-коммунального хозяйства, с целью сокращения объемов шламов, отправляемых на захоронение. Энергетическая составляющая играла дополнительную роль. Такой подход обеспечивал и обеспечивает минимизацию поступления органических загрязнителей в окружающую среду.

В Республике Беларусь сложились специфические условия по формированию сырьевой базы для использования ее в биогазовых технологиях. Главными видами сырья в настоящее время являются органические отходы животноводства – в основном это навоз сельскохозяйственных животных (вторичная биомасса). Переход животноводства на индустриальную основу и связанная с этим процессом концентрация животных на крупных фермах и комплексах обусловили резкое увеличение объемов образования навоза и навозных стоков.

Навоз представляет из себя специфический субстрат для использования его в биогазовой ферментации по следующим причинам: 1) высокое содержание влажной фракции, что требует высоких затрат тепловой энергии на ее нагрев до оптимальной температуры брожения; 2) высокое содержание углерода при низком содержании азота, что требует дополнительных добавок растительного сырья в биореактор; 3) достаточно высокое содержание серы, что приводит к необходимости доработки (улучшения качества) производимого биогаза; 4) наличие вредных примесей в виде антибиотиков, остаточного содержания пестицидов и других токсических соединений, что требует доработки (очистки) получаемого биогаза, и некоторые другие особенности.

Процессы брожения с использованием одного типа субстрата протекают с переменной скоростью, возможны затухание и полная остановка процесса ферментации. Поэтому в установившейся практике биогазовых технологий используют специально подготовленные рецептуры брожения биомассы, с учетом их особенностей по составу и объемам образования. Для условий нашей страны необходимой добавкой к навозу сельскохозяйственных животных является зеленая измельченная масса, чаще всего кукурузы, зерновых или специальных энергетических (типа силфи) культур. Энергетические культуры для добавления их в биореакторы специально выращивают в хозяйствах с учетом структуры посевных площадей. Дополнительной добавкой к бродящей массе могут быть органические отходы с высоким содержанием жирной и белковой фракций пищевой и перерабатывающей промышленности.

Необходимым условием успешного протекания метаногенеза является непрерывность микробиологического процесса. Это приводит к необходимости создания резервов исходного органического сырья на основе функционирования логистических цепочек.

Поэтапное развитие биогазовых технологий в Республике Беларусь происходит в рамках энергетического строительства и формирования сырьевой базы, что определяется особенностями экономического развития [2]. По состоянию на 31.07.2023 [5], на территории страны функционируют 37 биогазовых комплексов общей установленной мощностью 53,682 МВт. При этом за последние годы общая установленная мощность биогазовых заводов возросла на 13 %.

Влажность субстрата является главным параметром для выбора используемой технологии метанового брожения. Используют две технологии сбраживания – влажную и сухую ферментацию. Влажная ферментация происходит с добавлением воды в бродящую биомассу либо с использованием субстратов, содержащих значительную водную фракцию (до 90 % и выше). Сухая ферментация происходит без добавления воды в бродящую массу. Поэтому функционирующие на территории страны биогазовые комплексы условно разделим на две основные категории по используемым технологиям и соответственно оборудованию.

К первой категории можно отнести 16 биогазовых заводов общей мощностью 21,219 МВт, находящихся на территории крупных животноводческих ферм. Соответственно сырьем для этих предприятий служат органические отходы животноводства, характеризующиеся высокой влажностью. Производство биогаза осуществляется в биореакторе, применение когенерационных установок позволяет повысить коэффициент выхода энергии на тонну перерабатываемых отходов.

Отрасль животноводства характеризуется высокой степенью концентрации и производственной специализации. На территории страны функционирует 108 крупных государственных ферм по откорму крупного рогатого скота, 120 крупных свинокомплексов и около 60 птицеводческих хозяйств, которые производят до 300 тыс. т жидких органических отходов в сутки, или в пересчете 30 млн м<sup>3</sup> сточных вод в год.

Примерами использования влажных технологий является производственная деятельность биогазовых заводов в ОАО «Рассвет» имени К. П. Орловского Могилевской области (мощность 4,8 МВт), ЗАО «ТДФ Экотех-Снов» Минской области (мощность 2,126 МВт) и других предприятий агропромышленного комплекса.

При мокром (с добавлением воды) методе получения биогаза оптимальное содержание исходного сухого вещества составляет 15 %. При содержании сухого вещества менее 5 % возникает необходимость добавления воды, что требует ее нагрева до оптимальной температуры брожения. Однако содержание сухого вещества выше 15 % делает невозможным перекачку субстратов насосом, их эффективного перемешивания и смешивания [7].

Технология мокрой (влажной) ферментации обеспечивает относительную стабильность микробиологического процесса и гарантированное получение метана. С точки зрения использования энергии, влажная фермен-

тация требует дополнительного расхода энергии на транспортировку и нагрев воды, что снижает энергоэффективность вследствие неизбежных потерь теплоты. Несмотря на указанные недостатки, процесс влажного брожения используют чаще метода сухого сбраживания ввиду гарантированного выхода метана. Еще одним существенным преимуществом такой технологии является получение биогаза (дигестата) контролируемого состава, из которого возможно получать органическое удобрение простым удалением избытка воды механическими способами.

Однако в дигестате могут содержаться токсичные вещества (ионы тяжелых металлов, антибиотики и др.), которые, попадая в почву, не разлагаются почвенными микроорганизмами. Поэтому дигестат требует соответствующей доработки, улучшения качества, чтобы превратить его в биогаз для дальнейшего устойчивого использования. При внесении в почву дигестат улучшает условия функционирования почвенных микроорганизмов и повышает ее плодородие. Переработка органического осадка в экологически чистый биогаз не только позволяет улучшить экономические показатели производства биогаза, но и замыкает цепочку жизненного цикла отходов, делая биогазовые технологии практически безотходными и низкоуглеродными [8].

Ко второй категории биогазовых комплексов можно отнести 21 биогазовую установку. В этом случае используются газопоршневые агрегаты и когенерационные установки общей установленной мощностью 32,463 МВт. Биогазовые установки второй категории функционируют на полигонах твердых бытовых отходов (ТБО), выведенных из эксплуатации, на которых началось образование свалочного газа. Установки позволяют интенсифицировать выработку метана, очистить его от примесей и получать газобразное топливо постоянного состава, уменьшая количество ТБО на полигонах.

Такие биогазовые комплексы устанавливают на полигонах ТБО вблизи крупных и средних городов. Среди биогазовых комплексов этой категории можно выделить КУПП «Брестский мусороперерабатывающий завод», г. Брест (мощность 3,192 МВт); СЗАО «ТелДаФакс Экотех МН», Минская область, полигон ТБО «Тростенецкий» (мощность 2,997 МВт); ЗАО «ТелДаФакс Экотех-Северный» Минская область, Минский район, д. Дубовляны (мощность 2,816 МВт).

Необходимость ликвидации полигонов хранения ТБО, простота технологии и невысокая стоимость оборудования [9] положительно сказались на увеличении количества и мощности биогазовых установок за 2018–2022 гг.

Сухая ферментация происходит без добавления воды в бродящую биомассу. С использованием технологии сухой ферментации получают свалочный газ из твердых отходов жилищно-коммунального хозяйства для производства электрической энергии, при этом значительно уменьшив количество отходов на полигонах, вплоть до сокращения мест складирования и захоронения отходов. Так как процесс осуществляется непосредственно

на месте хранения и складирования ТБО, отсутствуют затраты на транспортировку сырья и дополнительный обогрев зоны реакции. В то же время микробиологическое разложение протекает нестабильно, ускорение образования метана сменяется затуханием процесса и даже возможным его прекращением, что приводит к необходимости перезапуска. Этот метод позволяет перерабатывать сыпучие материалы с содержанием сухого вещества свыше 25–40 %, увеличение содержания сухого вещества в субстрате от 40 до 60 % делает его пригодным только к компостированию.

Образующийся твердый остаток (дигестат) затруднительно использовать в качестве органического удобрения вследствие непостоянного состава и присутствия тяжелых металлов и патогенной микрофлоры в ТБО. Затраты на устранение этих недопустимых для удобрений компонентов делают переработку дигестата экономически не выгодной.

Получаемый в анаэробных условиях методом ферментации биогаз состоит в основном из метана и углекислого газа. В соответствии с [10], получаемый в анаэробных условиях биогаз имеет следующий состав: метан – 60 %, углекислый газ – 33,5, азот – 3,0, кислород – 0,5, водород – 1, сероводород – 2 %. Качественный состав биогаза, а также его энергетические характеристики наибольшее сходство имеют с природным газом, который состоит на 98 % из метана.

По своему составу биогаз достаточно близок к природному газу, принципиальным отличием является высокое содержание углекислого газа – иногда до 40 (в среднем – 20–30 %). Однако следует отметить, что содержание углекислого газа в биогазе находится в пределах его естественного природного цикла, то есть углеродный след при использовании биогаза в качестве топлива отсутствует. Содержание углекислого газа отличается широкой вариабельностью, вследствие того что биогаз является продуктом естественного микробиологического процесса разложения различных видов биомассы, т. е. содержание углекислого газа варьируется в зависимости от используемых субстратов. Высокое содержание углекислого газа определяет низкую теплотворную способность биогаза (в сравнении с природным газом – 21,77 МДж/м<sup>3</sup>). При этом теплотворная способность биогаза выше, чем у твердых видов топлива (торф, древесина), что делает его весьма ценным местным видом топлива. Также можно отметить наличие в биогазе следов азота и сероводорода. Сероводород может быть причиной коррозии биогазового оборудования.

Для химической очистки (улучшения состава) биогаза применяют традиционные методы типа абсорбции и адсорбции. К наиболее доступным и эффективным по техническому исполнению и оборудованию методам можно отнести промывку водой для удаления механических примесей, сероводорода и аммиака, а также реагентный способ очистки в щелочной среде, позволяющий не только эффективно удалять углекислый газ и сероводород, но и другие загрязнители. К недостаткам этого метода очистки

можно отнести высокий расход реагентов и формирование большого объема отходов.

Современные адсорбционные методы с использованием органических и неорганических сорбентов высокоэффективны, однако требуют предварительной очистки биогаза, в первую очередь от паров воды, методом активного его высушивания. Существенным недостатком является регенерация сорбентов, что значительно удорожает процесс получения биогаза и увеличивает нагрузку на окружающую среду в виде отработанных сорбентов и образующихся отходов.

В настоящее время также применяют такие инновационные методы очистки биогаза, как мембранные и криогенные технологии разделения, биотехнологические методы очистки. Мембранные технологии не имеют вышеупомянутых недостатков, поскольку отделение метана от других компонентов газа обеспечивается за счет разницы в скоростях диффузии через мембрану молекул различных газов. При этом чистота получаемого газа зависит от вида мембраны, ее поверхности, скорости потока и количества ступеней разделения. В оборудовании, используемом для очистки биогаза, применяют как неорганические и полимерные мембраны, так и мембраны со смешанной матрицей. Использование в промышленных масштабах неорганических мембран сдерживается высокими эксплуатационными расходами, несмотря на их высокую термическую и химическую стабильность. Высокая проницаемость полимерных мембран по сравнению с неорганическими обусловлена повышенным коэффициентом диффузии и, как следствие, более высокой растворимостью углекислого газа. Мембраны со смешанной матрицей на основе неорганического наполнителя и органического полимера характеризуются более высокой проницаемостью и селективностью за счет механизма разделения, действующего как барьер молекулярного сита на границе раздела фаз [11].

Биотехнологические методы доработки биогаза основаны на применении микроорганизмов, потребляющих углекислый газ, сероводород и аммиак, например сульфатредуцирующих, ацетофильных и аннамокс-бактерий. Внесение таких бактерий и водорода непосредственно в биореактор позволяет совместить технологический процесс получения биогаза с его очисткой и не требует дополнительного очистного оборудования. Биотехнологии очистки возможно применять и непосредственно перед использованием биогаза при малом расстоянии до потребителя, не требующем значительных транспортных расходов.

Биотехнологии очистки, основанные на способности микроводорослей расходовать углекислый газ и сероводород для фотосинтеза, успешно применяются в других отраслях и могут быть использованы и для очистки биогаза. Из отработанной биомассы микроводорослей возможно получение сульфатного удобрения, также возможен ее рециклинг в биореактор как сырья. Таким образом, исключается образование отхода при очистке.

Криогенная технология очистки газов основана на принципе разделения веществ, имеющих разное агрегатное состояние при определенной температуре. Процесс разделения протекает при сжатии газовой смеси, в ходе которого основное вещество (метан) остается в газообразной форме, а загрязнители удаляются в твердом или жидком виде. Образующийся углекислый газ в жидкой форме может реализовываться как самостоятельный продукт, востребованный в пищевой промышленности. Однако следует отметить, что обеспечение безотходности криогенной технологии приводит к удорожанию всего процесса в целом (до 30 % получаемой энергии расходуется на систему очистки), в то же время, учитывая доходность от реализации побочного продукта и экологической значимости, данный метод представляется весьма перспективным.

Объединение нескольких методов в единую систему очистки позволяет компенсировать недостатки применения способов очистки по отдельности. Так, сочетание мембранного разделения с водной абсорбцией, химической очисткой или криогенным разделением эффективнее этих методов по отдельности за счет низких эксплуатационных затрат, высокой степени поглощения углекислого газа и сероводорода, более высоких уровней чистоты метана и меньшего потребления энергии.

Нами проведена оценка теоретического и технически возможного потенциала получения биогаза в Республике Беларусь с использованием органических отходов животноводства. В расчетах учитывались данные по поголовью скота и птицы в сельскохозяйственных организациях страны на начало года в период с 2019 по 2023 г. [12], а также данные по объему производства биогаза от одного животного или птицы [13] (табл. 1). Так, по состоянию на начало 2023 г., численность крупного рогатого скота в сельскохозяйственных организациях Республики Беларусь составила 4128 тыс. голов, свиней – 2267 тыс., овец – 11 тыс., коз – 2 тыс., лошадей – 10 тыс. голов, птицы – 48757,5 тыс. [12].

Таблица 1

**Поголовье скота и птицы в сельскохозяйственных организациях  
(на начало года, тыс. голов)**

**Livestock and poultry in agricultural organizations  
(at the beginning of the year, thousand head of cattle)**

Вид животного	Средний выход биогаза на голову, м <sup>3</sup> /год	Поголовье скота и птицы в сельскохозяйственных организациях (на начало года, тыс. голов)				
		2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Крупный рогатый скот	498	4241	4202	4200	4150	4128
Свиньи	91,3	2480	2545	2558	2276	2267
Овцы	135	13	13	14	12	11
Козы	135	1	1	1	1	2
Лошади	325	17	15	13	12	10
Птица	5,8	46293,0	48190,9	42998,1	43939,5	48757,5

При оценке теоретического и технически возможного потенциала получения биогаза были учтены следующие факторы:

1. На собственные нужды биогазовой установки (подогрев сырья и поддержание заданной температуры в метантенках) расходуется около одной пятой части производимой в ней энергии [13].

2. Системы удаления навоза не всегда позволяют использовать весь объем образовавшихся продуктов жизнедеятельности в качестве сырья для производства биогаза. В связи с этим использовались корректирующие коэффициенты:

– 0,7 – коэффициент, учитывающий функционирование системы удаления навоза крупного рогатого скота, лошадей, овец и коз;

– 0,8 – то же, учитывающий особенности использования водной системы удаления навоза на свинокомплексах;

– 1,0 – то же, учитывающий особенности использования системы сбора навоза на птицефабриках [13].

Результаты расчета теоретического и технически возможного потенциала получения биогаза на территории Республики Беларусь приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2

**Теоретический потенциал получения биогаза из отходов животноводства в Республике Беларусь**

**Theoretical potential of biogas production from animal husbandry waste in the Republic of Belarus**

Вид животного	2019 г.		2020 г.		2021 г.		2022 г.		2023 г.	
	млн м <sup>3</sup> /год	тыс. т у. т./год	млн м <sup>3</sup> /год	тыс. т у. т./год	млн м <sup>3</sup> /год	тыс. т у. т./год	млн м <sup>3</sup> /год	тыс. т у. т./год	млн м <sup>3</sup> /год	тыс. т у. т./год
Крупный рогатый скот	1689,6	1250,3	1674,1	1238,8	1673,3	1238,2	1653,4	1223,5	1644,6	1217,0
Свиньи	181,1	134,0	185,9	137,6	186,8	138,3	166,2	123,0	165,6	122,5
Овцы	1,4	1,0	1,4	1,0	1,5	1,1	1,3	1,0	1,2	0,89
Козы	0,11	0,08	0,11	0,08	0,12	0,08	0,12	0,08	0,22	0,16
Лошади	4,4	3,3	3,9	2,9	3,4	2,5	3,1	2,3	2,6	1,9
Птица	214,8	158,9	223,6	165,5	199,5	147,6	203,9	150,9	226,2	167,4
Итого	2091,4	1547,6	2089,0	1545,9	2064,6	1527,8	2028,0	1500,8	2040,4	1509,9

Теоретический потенциал биогаза из отходов животноводства на начало 2023 г. составляет 2040,4 млн м<sup>3</sup>/год, а технически возможный потенциал – 1512,7 млн м<sup>3</sup>/год.

Для увеличения выхода биогаза возможно использовать не только основное сырье (отходы жизнедеятельности животных), но и отходы пищевой промышленности (в первую очередь мясокомбинатов), а также отходы растениеводства (зеленая масса, силос, солома и др.). Потенциальным сырьем для производства биогаза могут служить отходы от производства рапсового масла – 660 м<sup>3</sup> на тонну отходов рапсового жмыха, а также силос кукурузы и солома зерновых культур – соответственно 200 м<sup>3</sup> и 190 м<sup>3</sup> на тонну отходов [14]. Площади возделывания озимого рапса, кукурузы и зерновых культур стабильны и имеют тенденцию к расширению, поэтому использование этих растительных отходов в качестве субстрата может существенно увеличить выход биогаза в условиях Республики Беларусь.

Таблица 3

**Технически возможный потенциал получения биогаза из отходов животноводства в Республике Беларусь**  
**Technically possible potential of biogas production from animal husbandry waste in the Republic of Belarus**

Вид животного	2019 г.		2020 г.		2021 г.		2022 г.		2023 г.	
	млн м <sup>3</sup> /год	тыс. т у. т./год	млн м <sup>3</sup> /год	тыс. т у. т./год	млн м <sup>3</sup> /год	тыс. т у. т./год	млн м <sup>3</sup> /год	тыс. т у. т./год	млн м <sup>3</sup> /год	тыс. т у. т./год
Крупный рогатый скот	1182,7	875,2	1171,9	867,2	1171,3	866,8	1157,4	856,5	1151,2	851,9
Свиньи	144,9	107,2	148,7	110,1	149,4	110,6	132,9	98,4	132,5	98,1
Овцы	0,98	0,73	0,98	0,73	1,1	0,8	0,9	0,7	0,84	0,62
Козы	0,08	0,06	0,08	0,06	0,08	0,06	0,08	0,06	0,15	0,11
Лошади	3,1	2,3	2,7	2,0	2,4	1,8	2,2	1,6	1,8	1,3
Птица	214,8	158,9	223,6	165,5	199,5	147,6	203,9	150,9	226,2	167,4
Итого	1546,6	1144,4	1548,0	1145,6	1523,8	1127,7	1497,4	1108,2	1512,7	1119,4

**ВЫВОДЫ**

1. Изменение структуры производства электроэнергии в Республике Беларусь с вводом в эксплуатацию Белорусской АЭС приводит к необходимости изменения производственной деятельности биогазовых комплексов. Производство возобновляемой энергии из биомассы остается актуальным, поскольку способствует декарбонизации энергетического сектора и имеет неоспоримые экологические преимущества. В сложившихся услови-

ях для каждого функционирующего биогазового комплекса следует разработать индивидуальный проект по улучшению производственной деятельности, в том числе по оптимизации структуры производимой энергии и ее использованию, а также получению дополнительных продуктов с добавленной стоимостью (биогумус и др.).

2. По результатам оценки технически возможного потенциала биогаза из отходов животноводства, при сохранении численности поголовья скота в сельскохозяйственных организациях на уровне начала 2023 г., имеется возможность ежегодного замещения в топливном балансе республики 982 млн м<sup>3</sup> природного газа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период 2030 года [Электронный ресурс]. Минск, 2017. Режим доступа: <https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR2030/Natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitija-Respubliki-Belarus-na-period-do-2030-goda.pdf>.
2. О Государственной программе «Энергосбережение» на 2021–2025 годы [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 24 февр. 2021 г., № 103 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100103>.
3. Любчик, О. А. Минимизация влияния возобновляемых источников энергии на работу энергосистемы путем совместного использования солнечной и ветряной генераций / О. А. Любчик, С. В. Быстрых, А. Н. Казак // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 5. С. 423–432. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-423-432>.
4. Кляусова, Ю. В. Перспективы развития биогазовых технологий в Республике Беларусь / Ю. В. Кляусова, А. А. Цыганова, Г. В. Бельская // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 4. С. 52–56.
5. Реестр выданных сертификатов о подтверждении происхождения энергии на 31.07.2023 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://minpriroda.gov.by/uploads/files/2023/Reestr-sertifikatov-aktual.docx>.
6. Кляусова, Ю. В. Управление осадком метанового брожения биомассы для получения биогаза / Ю. В. Кляусова, А. А. Цыганова, Г. В. Бельская // Вестник Брестского государственного технического университета. 2024. № 1 (133). С. 144–148. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2024-133-1-144-148>.
7. Величко, В. В. Эффективность и проблемы использования биогазовых технологий / В. В. Величко, С. П. Кундас // Сахаровские чтения 2016 года: экологические проблемы XXI века: материалы 16-й Междунар. науч. конф., 19–20 мая 2016 г., г. Минск / под ред. С. А. Маскевича, С. С. Позняка, Н. А. Лысухо. Минск: МГЭИ им. А.Д. Сахарова БГУ, 2016. С. 266.
8. Kliausava, Y. V. Using of organic sludge to improve the efficiency of biogas technologies / Y. V. Kliausava, H. A. Tsyhanava, H. V. Belskaya // Вестник Брестского государственного технического университета. 2023. № 3 (132). С. 75–77. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2023-132-3-75-77>.
9. Исаков, В. Г. Энергетическая эффективность малого биореактора в различных климатических зонах / В. Г. Исаков, А. А. Абрамова, М. Ю. Дягелев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергетич. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 4. С. 355–364. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-355-364>.

10. Бельская, Г. В. Оценка эффективности использования биогазовых технологий при производстве энергии в Республике Беларусь / Г. В. Бельская, Е. В. Зеленухо, П. В. Зубик // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 12-й Междунар. науч.-техн. конф. Т. 4. Минск: БНТУ, 2014. С. 482–483.
11. Бельская, Г. В. Факторы повышения эффективности производства и использования биогаза / Г. В. Бельская, А. А. Хрипович, Е. В. Зеленухо // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: сб. науч. трудов 16-й Междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. Тула, 2020. Т. 1. С. 71–77.
12. Сельское хозяйство Республики Беларусь [Электронный ресурс]: Статистический буклет / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. Минск, 2023. Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/e44/omhrgtzoda196g3yr9b2r81r71vexa2k.pdf>.
13. Любчик, О. А. Исследование потенциала и получения биогаза в животноводческих комплексах Республики Беларусь / О. А. Любчик // Энергоэффективность. 2021. № 5. С. 24–27.
14. Зеленухо, Е. В. Основные направления повышения эффективности производства биогаза / Е. В. Зеленухо, Г. В. Бельская, И. В. Ролевич // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: сб. науч. трудов 15-й Междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. Минск, 2019. Т. 2. С. 104–110.

Поступила 27.06.2024 Подписана в печать 22.10.2024 Опубликована онлайн 29.11.2024

#### REFERENCES

1. *National Strategy for Sustainable Socio-Economic Development of the Republic of Belarus for the Period up to 2030*. Minsk, 2017. Available at: <https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR2030/Natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiija-Respubliki-Belarus-na-period-do-2030-goda.pdf> (in Russian).
2. On the “Energy Saving” State Program for 2021–2025. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus dated February 24, 2021 No 103. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100103> (in Russian).
3. Liubchik V. A., Bystrykh S. V., Kazak A. N. (2023) Minimizing of Renewable Energy Sources Impact on the Energy System Operation by the Joint Use of Solar and Wind Generation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (5), 423–432. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-423-432> (in Russian).
4. Kliausova Iu. V., Tsyganova A. A., Belskaia G. V. (2023) Prospects for the Development of Biogas Technologies in the Republic of Belarus. *Vestnik Belorusskoi Gosudarstvennoi Sel'skokhozyaistvennoi Akademii = Bulletin of the Belarussian State Agricultural Academy*, (4), 52–56 (in Russian).
5. The Register of Issued Certificates Confirming the Origin of Energy as of 07/31/2023. Available at: <https://minpriroda.gov.by/uploads/files/2023/Reestr-sertifikatov-aktual.docx> (in Russian).
6. Kliausava Y. V., Tsyhanava H. A., Belskaya H. V. (2024) Management of Sludge Produced by Biomass Methane Fermentation to Obtain Biohumus. *Vestnik of Brest State Technical University. Civil Engineering and Architecture*, (1), 144–148. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2024-133-1-144-148> (in Russian).
7. Velichko V. V., Kundas S. P. (2016) Efficiency and Problems of Biogas Technologies. *Sakharov Readings 2016: Environmental Problems of the XXI Century. Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Scientific Conference May 19–20, 2016 Minsk*. Minsk, International State Eco-

- logical Institute Named after A. D. Sakharov of the Belarusian State University, 266 (in Russian).
8. Kliausava, Y. V., Tsyhanava, A. A., Belskaya, G. V. (2023) Using of Organic Sludge to Improve the Efficiency of Biogas Technologies. *Vestnik of Brest State Technical University*, No 3 (132), 75–77. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2023-132-3-75-77>.
  9. Isakov V. G., Abramova A. A., Dyagelev M. Yu. (2020) Energy Efficiency of a Small Bioreactor in Various Climatic Zones. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (4), 355–364. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-355-364> (in Russian).
  10. Belskaya G. V., Zelenukho E. V., Zubik P. V. Evaluation of the Efficiency of Using Biogas Technologies in Energy Production in the Republic of Belarus. *Science – to Education, Manufacturing, Economy: Materials of the 12<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference*. (4), Minsk: BNTU, 2014, 482–483.
  11. Belskaya G. V., Khrypovich A. A., Zelenukho E. V. (2020) Factors of Increasing the Efficiency of Biogas Production and Use. *Sotsial'no-Ekonomicheskie i ekologicheskie Problemy Gornoj Promyshlennosti, Stroitel'stva i Energetiki: sb. nauch. trudov 16-i Mezhdunar. konf. po Problemam Gornoj Promyshlennosti, Stroitel'stva i Energetiki. T 1* [Socio-Economic and Ecological Problems of Mining, Construction and Energy: Collection of Scientific Papers of the 16<sup>th</sup> International Conference on Problems of Mining, Construction and Energy. Vol. 1]. Tula, 71–77 (in Russian).
  12. National Statistical Committee of the Republic of Belarus (2023) *Agriculture of the Republic of Belarus. Statistical Booklet*. Minsk. Available at: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/e44/omhrgtzoda196g3yr9b2r81r71vexa2k.pdf> (in Russian).
  13. Lyubchik O. A. (2021) Investigation of the Potential and Production of Biogas in Livestock Complexes of the Republic of Belarus. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, (5), 24–27 (in Russian).
  14. Zelenukho E. V., Belskaya G. V., Rolevich I. V. (2019) The Main Directions of Increasing the Efficiency of Biogas Production. *Sotsial'no-Ekonomicheskie i Ekologicheskie Problemy Gornoj Promyshlennosti, Stroitel'stva i Energetiki: sb. nauch. trudov 15-i Mezhdunar. konf. po Problemam Gornoj Promyshlennosti, Stroitel'stva i Energetiki. T. 2* [Socio-Economic and Environmental Problems of Mining, Construction and Power Engineering” – the 15<sup>th</sup> International Conference on Mining, Construction and Power Engineering. Collection of Scientific Papers. Vol. 2]. Minsk, BNTU, 104–110 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-544-557>

УДК 620.98: 658.264

## **Анализ фактического состояния предызолированных трубопроводов систем централизованного теплоснабжения после эксплуатации**

**В. А. Седнин<sup>1)</sup>, А. В. Седнин<sup>1)</sup>, А. И. Бондарович<sup>1)</sup>, И. А. Некало<sup>1)</sup>, А. Д. Мухин<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

**Реферат.** В статье рассматриваются вопросы, связанные с фактическим состоянием предызолированных (ПИ) трубопроводов систем централизованного теплоснабжения (СЦТ). Часть из находящихся в эксплуатации трубопроводов подходит к расчетному сроку службы, поэтому актуальным является вопрос их дальнейшего использования. Старение трубопроводов СЦТ происходит вследствие различных процессов, связанных как с температурными режимами работы, так и с окислением кислородом. Долговечность полимерных материалов ПИ-труб можно оценить с помощью эмпирического или прогнозного способа. Для шести партий ПИ-труб, находившихся разное время в эксплуатации в СЦТ г. Минска, были проведены испытания по нормируемым параметрам с целью определения их фактических значений. Для большинства представленных образцов величины среднего размера ячеек, плотности термоизоляции, напряжения при деформации сжатия и количества закрытых пор в значительной мере соответствуют требованиям СТБ 2252–2012 для новых труб. Значение коэффициента теплопроводности находится в пределах 0,030–0,037 Вт/(м·К), что на 10 % выше требуемого показателя для новых труб. Значения предела прочности конструкции ПИ-трубы на сдвиг во многих испытаниях составили меньше 0,12 МПа, что говорит о потенциально возможном разрушении теплоизоляционной конструкции трубы. При этом отсутствует определенная зависимость как от срока эксплуатации труб, так и от температурного режима.

**Ключевые слова:** теплоснабжение, предызолированные трубы, пенополиуретан, срок службы, старение, предел прочности на сдвиг

**Для цитирования:** Анализ фактического состояния предызолированных трубопроводов систем централизованного теплоснабжения после эксплуатации / В. А. Седнин [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 6. С. 544–557. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-544-557>

---

### **Адрес для переписки**

Седнин Алексей Владимирович  
Белорусский национальный  
технический университет  
пр. Независимости, 65/2,  
220113, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 397-36-20  
[Sednin@bntu.by](mailto:Sednin@bntu.by)

### **Address for correspondence**

Sednin Alexei V.  
Belarusian National  
Technical University  
65/2, Nezavisimosty Ave.,  
220113, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 397-36-20  
[Sednin@bntu.by](mailto:Sednin@bntu.by)

---

## Analysis of the Actual Condition of Pre-Insulated Pipelines of District Heating Systems After Operation

V. A. Sednin<sup>1)</sup>, A. V. Sednin<sup>1)</sup>, A. I. Bondarovich<sup>1)</sup>, I. A. Nekalo<sup>1)</sup>, A. D. Mukhin<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The article discusses issues related to the actual condition of pre-insulated (PI) pipelines of district heating systems (DHS). Some of the pipelines in operation are approaching their estimated service life, so the issue of their further use is relevant. The aging of the heating supply pipelines occurs due to various processes associated with both operating temperature regimes and oxidation. The durability of polymer materials used in pre-insulated pipes can be assessed through empirical or predictive methods. For six batches of PI pipes that were in operation at different times in the Minsk DHS, tests were carried out according to standardized parameters in order to determine their actual values. For most of the samples presented, the values of the average cell size, thermal insulation density, compression strain stress and the number of closed pores significantly meet the requirements of STB 2252–2012 for new pipes. The value of the thermal conductivity coefficient is in the range of 0.030 to 0.037 W/(m·K), which is 10 % higher than the required value for new pipes. Values of the shear strength limit of the pre-insulated pipe construction in many tests was less than 0.12 MPa, indicating a potential risk of failure in the thermal insulation structure of the pipe. Besides, there is no specific correlation with either the service life of the pipes or the temperature regime.

**Keywords:** district heating system, pre-insulated pipes, polyurethane foam, service life, degradation, axial shear strength

**For citation:** Sednin V. A., Sednin A. V., Bondarovich A. I., Nekalo I. N., Mukhin A. D. (2024) Analysis of the Actual Condition of Pre-Insulated Pipelines of District Heating Systems After Operation. *Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (6), 544–557. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-544-557>

### Введение

В большинстве стран СНГ, а также в ряде стран Северной и Центральной Европы теплоснабжение крупных городов обеспечивается системами централизованного теплоснабжения (СЦТ). В настоящее время системы теплоснабжения находятся в состоянии трансформации и перехода к качественно новым условиям функционирования, особенно в странах Западной Европы [1], а также рассматриваются в качестве основного элемента энергетических систем будущего [2]. Системы теплоснабжения включают в себя источники тепловой энергии, системы ее транспорта и тепловых потребителей. Системы транспорта тепловой энергии имеют критическое значение для надежной и эффективной работы СЦТ [3]. В настоящее время в СЦТ применяются в основном предизолированные (ПИ) трубопроводы, состоящие из трех основных элементов: стальной трубы, пенополиуретанового (ППУ) изоляционного слоя и полиэтиленовой оболочки [4, 5]. Часть из находящихся в эксплуатации трубопроводов подходит к расчетному сроку службы в соответствии с требованиями нормативных документов [6, 7], поэтому актуальным является вопрос их дальнейшей

эксплуатации. Старение трубопроводов СЦТ происходит вследствие различных процессов, связанных как с температурными режимами работы, так и с окислением кислородом. При этом используемые методы для прогнозирования расчетного срока эксплуатации трубопроводов дают различные результаты [8]. Важной особенностью ПИ-труб подземной бесканальной прокладки является то, что три материала (сталь, полиуретан и полиэтиленовая оболочка) образуют композитную систему, воспринимающую нагрузки, возникающие при тепловом расширении материала несущей трубы (стали). Для нормальной работы трубопровода необходимо, чтобы сила теплового расширения от стальной трубы передавалась через слой пенополиуретана на оболочку, при этом скольжение должно происходить на границе оболочки и грунта. В случае недостаточной прочности нарушается целостность конструкции, что вызывает неправильную работу компенсаторов, приводит к разрушению изоляции, намоканию обширных участков ППУ изоляции и коррозионному разрушению трубопровода.

Срок службы трубопроводной системы зависит от качества изготовления труб, выполнения работ по строительству трубопровода, эксплуатационных нагрузок и других местных граничных условий [9].

В Республике Беларусь предварительно изолированные трубы (рис. 1) производятся в соответствии с СТБ 2251–2012, СТБ 2252–2012, СТБ 2270–2012. По состоянию на 01.01.2023, протяженность ПИ-труб, находящихся на балансе РУП «Минскэнерго», составляла 1190,394 км. Данные [10] о времени эксплуатации и диаметрах магистральных и квартальных теплосетей, выполненных из ПИ-труб, РУП «Минскэнерго» представлены на рис. 2.

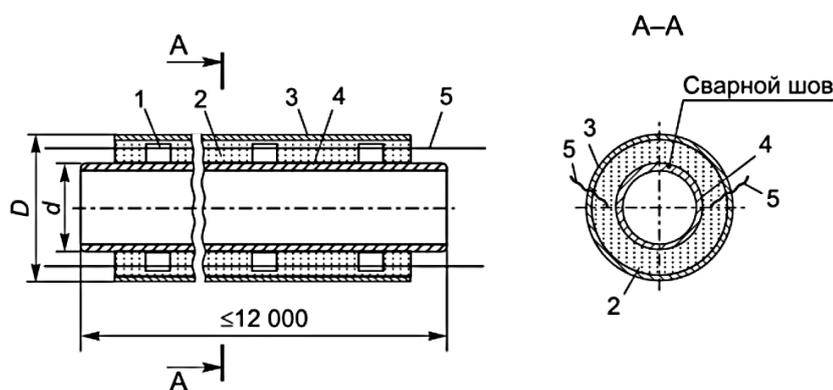


Рис. 1. Конструкция предизолированной трубы:

1 – центрирующая опора; 2 – пенополиуретановая термоизоляция; 3 – труба-оболочка из полиэтилена; 4 – стальная труба; 5 – проводники системы оперативного дистанционного контроля (условное изображение)

Fig. 1. The design of the pre-insulated pipe: 1 – centering support; 2 – polyurethane foam thermal insulation; 3 – polyethylene shell pipe; 4 – steel pipe; 5 – conductors of the operational remote control system (conditional image)

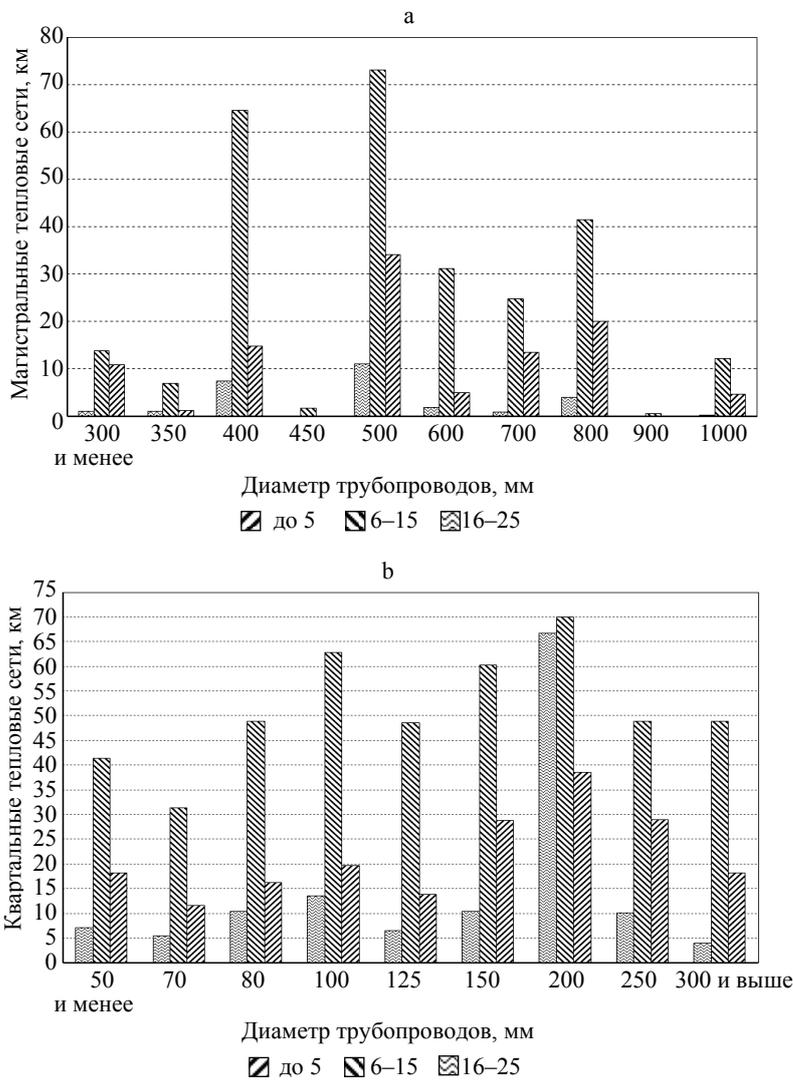


Рис. 2. Протяженность магистральных (а) и квартальных (б) предизолированных трубопроводов, находящихся на балансе РУП «Минскэнерго»

Fig. 2. The length of the main (a) and quarter (b) pre-insulated pipelines on the balance sheet of RUE Minskenergo

### Методы определения расчетного срока службы предизолированных труб

Долговечность полимерных материалов ПИ-труб можно оценить с помощью двух различных подходов: первого – эмпирического, основанного на оценке характеристик естественно состарившихся материалов и дальнейшей их математической обработке; второго – прогнозного, основанного на экспериментальных данных испытаний на ускоренное старение и математической оценке влияния зависимых и независимых переменных [11].

Согласно белорусскому и европейскому стандартам на изготовление ПИ-труб, оценку их технических характеристик проводят после выполнения искусственного старения пенополиуретана [6, 7]. Для проведения процесса старения термоизоляции из пенополиуретана по стальной трубе в течение 3600 ч (1450 ч) должна циркулировать жидкость ПЭС-4 с температурой 160 °С (170 °С) [11], после чего труба должна выдержать испытание на аксиальный сдвиг с предельным значением 0,12 МПа. Согласно [6], срок службы ПИ-труб централизованного теплоснабжения должен быть не менее 30 лет при условии непрерывной эксплуатации с максимальной температурой, не превышающей 120 °С.

Во многих исследованиях при проведении искусственного старения путем выдержки трубы при относительно высоких температурах оценивают прочность конструкции ПИ-трубы на сдвиг при разных значениях температуры и времени выдержки. Полученные таким образом результаты экстраполируют к средней расчетной температуре, при которой эксплуатируется трубопровод и оценивается прогнозный срок службы трубопровода [13].

Однако, как показывает практика, результаты, полученные таким способом, не дают полностью достоверной информации о том, как изменяются компоненты труб централизованного теплоснабжения с течением времени при их эксплуатации в рабочих условиях, что затрудняет прогнозирование реального срока их службы.

Некоторыми авторами были исследованы характеристики трубопроводов с разным сроком службы и сопоставлены результаты искусственного и естественного старения. Так, в [14] исследованы 10 труб, бывших в эксплуатации в системах централизованного теплоснабжения Швеции и Норвегии, с целью изучения влияния естественного старения на механическую адгезию и химическую структуру пенополиуретана. Показано, что в процессе эксплуатации трубопроводов CO<sub>2</sub> постоянно диффундирует из пены и замещается воздухом, что приводит к увеличению теплопроводности не более чем на 30 % [14]. Увеличение теплопроводности не считается достаточным основанием для окончания срока службы труб и их замены.

Результаты испытаний материалов с естественным старением, как правило, являются основной базой для любого подхода к прогнозированию срока службы трубопровода. Стоит отметить, что в настоящее время недостаточно данных, полученных при испытании труб после их эксплуатации. В частности, авторами [15] были исследованы трубы, находившиеся в эксплуатации до 26 лет, но закономерность их старения выявлена не была.

Предыдущие исследования показывают, что деградация полиуретана включает несколько сложных процессов, в том числе термический стресс в сочетании с окислительной деструкцией и проникновением влаги, а также, в меньшей степени, циклические механические нагрузки.

### Проведение испытаний образцов предызолированных труб, находящихся в эксплуатации

При проведении испытаний исследовались шесть партий предызолированных трубопроводов, находящихся в эксплуатации в системе теплоснабжения г. Минска (табл. 1). Каждая партия включала в себя образцы труб, трубопроводов как прямой (П), так и обратной (О) сетевой воды. Для измерения теплопроводности были подготовлены по пять образцов пенополиуретана для труб прямой и обратной сетевой воды и по три заготовки для проведения испытаний на сдвиг в осевом направлении (рис. 3).

Таблица 1

Исходные данные по ПИ-трубопроводам, находящимся в эксплуатации  
Initial data on pre-insulated pipelines in operation

Номер партии	Трубопровод	Наружный диаметр трубопровода, мм	Год прокладки	Тип прокладки
Партия 1	П1	273	2003	Бесканальная
	О1	273	2003	Бесканальная
Партия 2	П2	325	2012	В канале
	О2	325	2012	В канале
Партия 3	П3	325	2011	Бесканальная
	П3	325	2011	Бесканальная
Партия 4	П4	426	2006	Бесканальная
	О4	426	2006	Бесканальная
Партия 5	П5	530	1999	В футляре
	О5	530	1999	В футляре
Партия 6	П6	630	2011	Бесканальная
	О6	630	2011	Бесканальная



Рис. 3. Образцы труб и пенополиуретана для проведения испытаний

Fig. 3. Samples of pipes and polyurethane foam for testing

Параметры, которые измерялись при испытаниях, и их предельные значения приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Исходные данные по ПИ-трубопроводам, находившимся в эксплуатации**  
**Initial data on pre-insulated pipelines in operation**

Измеряемый параметр	Технические требования согласно [6]
<i>Термоизоляция из жесткого пенополиуретана</i>	
Средний размер ячеек	В радиальном направлении должен быть не более 0,5 мм
Кажущаяся плотность термоизоляции	Не менее 60 кг/м <sup>3</sup>
Напряжение при 10%-й деформации сжатия	Не менее 0,3 МПа
Водопоглощение по объему	После кипячения в течение 90 мин в дистиллированной воде должно быть не более 10 %
Количество закрытых пор	Количество закрытых пор в пенополиуретане должно быть не менее 82 %
Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)	Теплопроводность $\lambda$ жесткого пенополиуретана не должна превышать 0,033 Вт/(м·К)
<i>ПИ-трубы</i>	
Предел прочности конструкции ПИ-трубы на сдвиг в осевом направлении $\tau$ , МПа	Минимальное значение предела прочности конструкции ПИ-трубы на сдвиг составляет 0,12 МПа (температура при испытаниях $23 \pm 2$ °С)

Как уже было сказано, температурные режимы тепловых сетей оказывают большое влияние на эффективность работы предизолированных труб. На рис. 4 представлены фактические температурные графики на разных объектах СЦТ Минска за период с августа 2023 г. по май 2024 г., полученные в результате реализации программы по созданию цифровой диспетчерской [16]. Как видно, для объектов, подключенных к различным источникам тепловой энергии, профиль температурного графика практически одинаков. Большую часть времени температура прямой сетевой воды не превышает 70–75 °С и только в периоды низких температур наружного воздуха поднимается до 90–95 °С.

Температура обратной сетевой воды характеризуется меньшим диапазоном изменения и практически круглогодично находится в пределах 40–50 °С. На рис. 4е приведен тренд изменения температур прямой и обратной сетевой воды для одного из объектов СЦТ районной котельной «Шабаны», который также подтверждает большую амплитуду изменения температуры прямой сетевой воды.

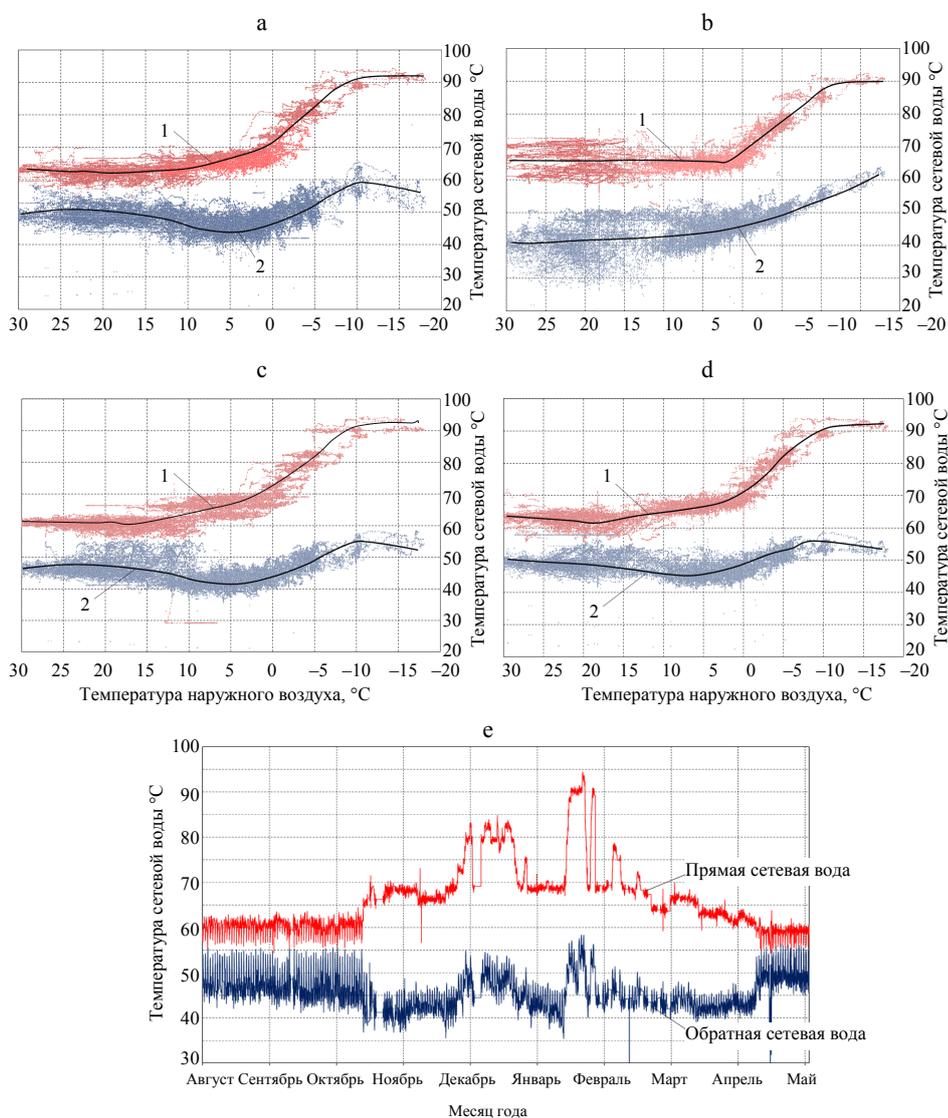


Рис. 4. Фактические температурные режимы СЦТ г. Минска: а – зона Минской ТЭЦ-4; б – то же Минской ТЭЦ-3; с – то же Минской ТЭЦ-2;

д – то же районной котельной «Шабаны»; е – тренд изменения температур прямой и обратной сетевой воды зоны районной котельной «Шабаны»

Fig. 4. Actual temperature conditions of the Minsk thermal power plant: а – zone of the Minsk CHP-4; б – the same of Minsk CHP-3; с – the same of Minsk CHP-2; д – the same of the district boiler house “Shabany”; е – the trend of temperature changes in direct and reverse mains water zone of the district boiler house “Shabany”

### Анализ полученных результатов

Результаты измерений основных параметров представлены на рис. 5. Стоит отметить, что для большинства представленных образцов величины среднего размера ячеек, плотности термоизоляции, напряжения при деформации сжатия и количества закрытых пор в значительной мере соответствуют требованиям СТБ 2252–2012. Исключение составляет партия 2,

для которой характерны большие плотность и водопоглощение по объему, что позволяет предположить, что данные трубы эксплуатировались в условиях подтопления. Для этой партии также характерны большие значения коэффициента теплопроводности (рис. 5а, б). Для остальных партий значения коэффициента теплопроводности находятся в пределах 0,030–0,037 Вт/(м·К), что на 10 % выше требуемого показателя для новых труб.

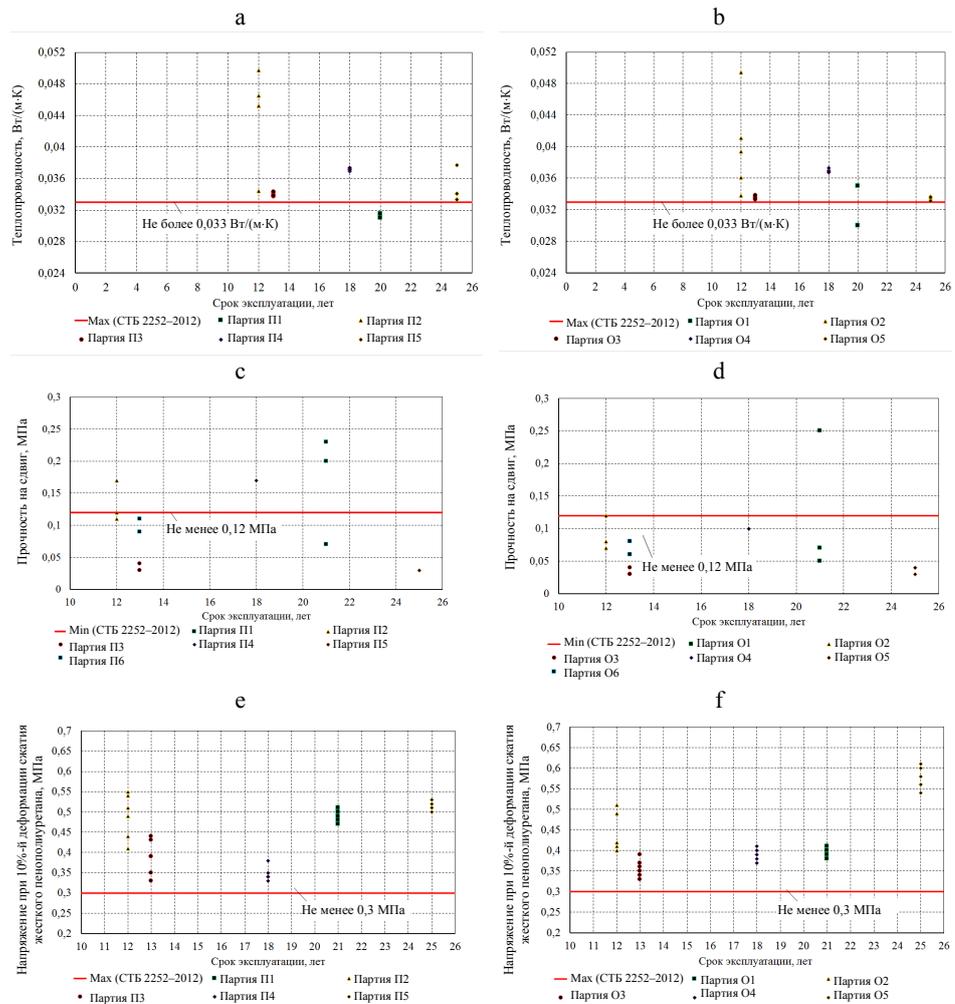
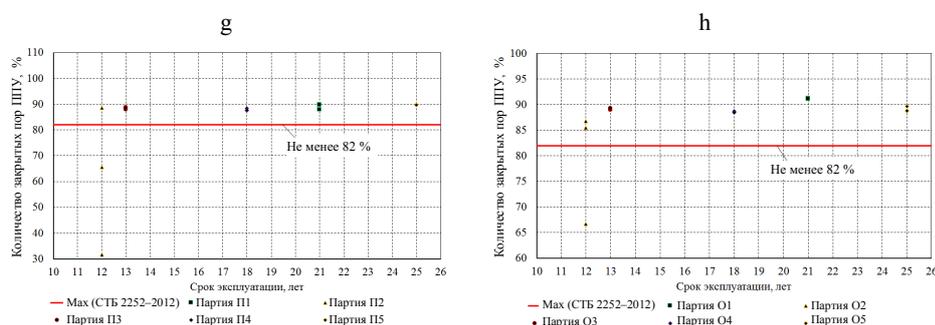


Рис. 5. Результаты испытаний образцов труб согласно СТБ 2252–2012: а, б – теплопроводность пенополиуретана трубопроводов прямой и обратной сетевой воды; с, д – предел прочности конструкции ПИ-трубопроводов прямой и обратной сетевой воды на сдвиг в осевом направлении; е, ф – напряжение при 10%-й деформации сжатия пенополиуретана трубопроводов прямой и обратной сетевой воды; г, h – количество закрытых пор пенополиуретана трубопроводов прямой и обратной сетевой воды (Окончание рис. 5 на с. 553)

Fig. 5. Test results of pipe samples according to STB 2252–2012: а, б – thermal conductivity of polyurethane foam of direct and reverse mains water pipelines; с, д – structural strength of pre-insulated pipelines of direct and reverse mains water for axial displacement; е, ф – voltage at 10% compression deformation of polyurethane foam of direct and reverse mains water pipelines; г, h – the number of closed pores of polyurethane foam of direct and reverse mains water pipelines (Ending of Fig. 5 is on page 553)



Окончание рис. 5

Ending of Fig. 5

Величины предела прочности конструкции ПИ-трубы на сдвиг во многих испытаниях составили меньше 0,12 МПа. При этом отсутствует однозначная зависимость от срока эксплуатации и температурного режима. На рис. 6а, б приведены значения предела прочности для исследуемых труб и значения, полученные аналогичным способом, для труб, находившихся в эксплуатации в системах теплоснабжения Германии, Норвегии [14] и Южной Кореи [17].

На рис. 6с, d представлены данные о том, в каком месте произошло разрушение конструкции ПИ-трубы: металл–ППУ (рис. 6с), когда сдвиг пенополиуретана (ППУ) произошел относительно металлической трубы, и ПЭ–ППУ (рис. 6d), когда произошел сдвиг полиэтиленовой (ПЭ) оболочки относительно ППУ. Как видно из графика, разрушения ПЭ–ППУ происходят при низких нагрузках и значениях, меньших 0,12 МПа. Примеры фотографий разрушений конструкции представлены на рис. 7.

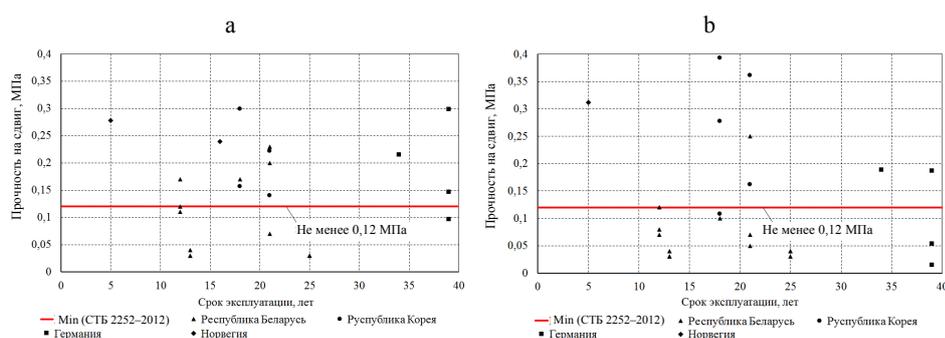
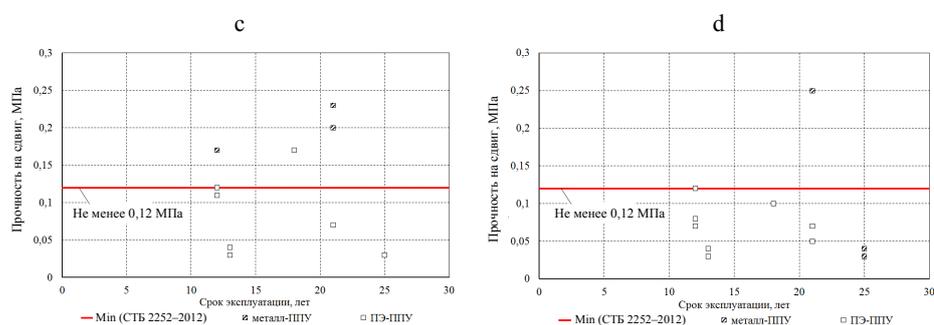


Рис. 6. Зависимость прочности при аксиальном сдвиге от срока эксплуатации трубопровода: а, б – для исследуемых ПИ-трубопроводов и трубопроводов, бывших в эксплуатации, в СЦТ Германии, Норвегии [14], Южной Кореи [17]; с, d – для исследуемых ПИ-трубопроводов с указанием места, где произошло разрушение (Окончание рис. 6 на с. 554)

Fig. 6. Dependence of the strength on the service life of the pipeline during axial shear: а, b – for pre-insulated pipelines under study and pipelines that were in operation in Germany, Norway [14], South Korea [17]; с, d – for the pre-insulated pipelines under study, indicating the location where the destruction occurred (Ending of Fig. 6 is on page 554)



Окончание рис. 6

Ending of Fig. 6

Значения осевого сдвига одинаковы для трубопроводов прямой и обратной сетевой воды, что позволяет говорить о незначительном влиянии фактического температурного режима работы СЦТ. Также сложно выделить зависимость значений осевого сдвига от срока эксплуатации.

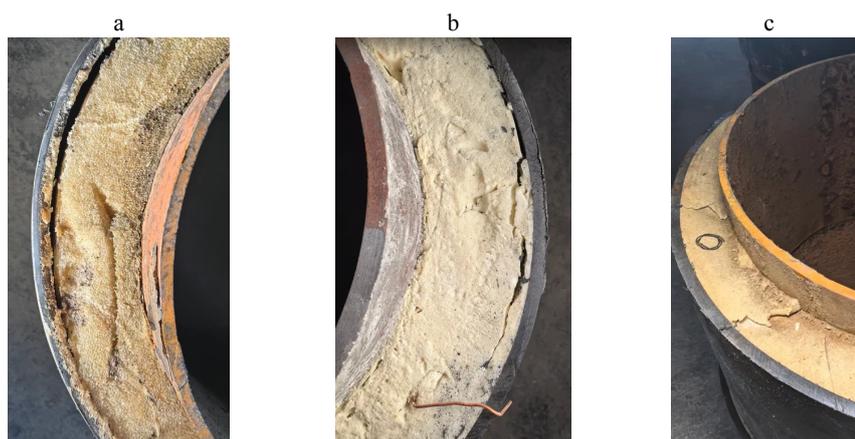


Рис. 7. Результаты разрушений образцов ПИ-труб, бывших в эксплуатации, при аксиальном сдвиге: а, б – ПЭ-ППУ; с – металл-ППУ

Fig. 7. The results of destruction of samples of pre-insulated pipes that were in operation during axial shear: а, б – PE-PUR; с – metal-PUR

## ВЫВОДЫ

1. Системы централизованного теплоснабжения являются и будут оставаться одними из важнейших элементов энергосистем будущего. Системы транспорта тепловой энергии определяют надежность и эффективность работы всей системы.

2. Проведенные исследования образцов предизолированных труб, находившихся в эксплуатации разный период времени, показали, что величины среднего размера ячеек, плотности термоизоляции, напряжения при деформации сжатия и количества закрытых пор в значительной мере соот-

ветствуют требованиям СТБ 2252–2012 для новых труб. Значения коэффициента теплопроводности образцов пенополиуретана находятся в пределах 0,030–0,037 (Вт/м·К), за исключением одной партии, для которой характерны большие плотность и водопоглощение по объему, что позволяет предположить длительную эксплуатацию в условиях подтопления. Величины предела прочности конструкции ПИ-трубы на сдвиг во многих испытаниях составили меньше 0,12 МПа, при которых произошел сдвиг полиэтиленовой оболочки относительно ППУ. При этом отсутствует определенная зависимость как от срока эксплуатации труб, так и от температурного режима.

3. Так как механизм естественного старения ПИ-труб систем централизованного теплоснабжения определяется многими факторами, необходимо продолжить исследования по анализу труб, находившихся в эксплуатации, с учетом их первоначальных характеристик.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Future District Heating Systems and Technologies: On the Role of Smart Energy Systems and 4<sup>th</sup> Generation District Heating / H. Lund [et al.] // *Energy*. 2018. Vol. 165. P. 614–619. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.115>.
2. Седнин, А. В. Проблемы развития гибридных систем теплоснабжения / А. В. Седнин, К. М. Дюсенов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024 Т. 67, № 2. С. 173–188. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-173-188>.
3. A Brief Overview of District Heating Pipe Network Progress / Safae El Mrabet [et al.] // *Energy Conversion and Management*. 2024 X, Volume 23, 2024, 100641, <https://doi.org/10.1016/j.encon.2024.100641>.
4. Исследование физико-механических свойств лабораторных и промышленных образцов теплоизоляционных материалов, применяемых для производства предизолированных труб, фасонных изделий и скорлуп / Л. В. Лучкина [и др.] // *Пластические массы*. 2019. № 11–12. С. 50–55. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2019-11-12-50-55>.
5. Weidlich, I. Reserves in axial Shear Strength of District Heating Pipes / I. Weidlich, M. Illguth, G. Banushi // *Energy Procedia*. 2018. Vol. 147. P. 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.037>.
6. District Heating Pipes. Preinsulated Bonded Pipe Systems for Directly Buried Hot Water Networks. Pipe Assembly of Steel Service Pipe, Polyurethane: EN 253 – 2020. European Committee for Standardization, 2020.
7. Трубы стальные, предварительно термоизолированные пенополиуретаном. Технические условия: СТБ 2252–2012. Взамен СТБ 1295–2001 в части труб стальных, предварительно термоизолированных пенополиуретаном; введ. 01.09.2012. Минск: Госстандарт: Стройтехнорм: Минсктиппроект, 2012. II, 18 с.
8. Status assessment, ageing, lifetime prediction and asset management of district heating pipes / S. Hay [et al.] [Electronic Resource] // *The 18<sup>th</sup> International Symposium on District Heating and Cooling*, September 3–6, 2023, Beijing, China. Mode of access: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/cce6c628-9a50-48a3-b11a-5105fda1e59f/content>.
9. Hay, S. Remaining Service Life of Preinsulated Bonded Pipes—A Key Element of Transformation Strategies and Future District Heating Systems in Germany / S. Hay, A. Leuteritz, M. Morgenthum // *Energy Reports*. 2021. Vol. 7, No 4, 2021. P. 440–448. <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2021.08.084>.
10. Пантелей, Н. В. Оценка состояния и анализ повреждаемости трубопроводов тепловых сетей / Н. В. Пантелей // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 2. С. 179–188. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-179-188>.

11. Jakubowicz, I. Research, Standardization and Practice in Accelerated Ageingtests / I. Jakubowicz // *Polimery*. 2024. Vol. 49, No 5. Art. 321e326. <https://doi.org/10.14314/polimery.2004.321>.
12. Accelerated Ageing of Plastic Jacket Pipes for District Heating / A. Leuteritz [et al.] // *Polymer Testing*. 2016. Vol. 51. P. 142–147. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.03.012>
13. Vega, A. Optimal Conditions for Accelerated Thermal Ageing of District Heating Pipes / A. Vega, N. Yarahmadi, I. Jakubowicz // *Energy Procedia*. 2018. Vol. 149. P. 79–83. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.171>.
14. Vega, A. Determining the Useful Life of District Heating Pipes: Correlation Between Natural and Accelerated Ageing / A. Vega, N. Yarahmadi, I. Jakubowicz // *Polymer Degradation and Stability*. 2020. Vol. 175. Art. 109117. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109117>.
15. Accelerated Ageing of Plastic Jacket Pipes for District Heating / A. Leuteritz [et al.] // *Polymer Testing*. 2016. Vol. 51. P. 142–147. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.03.012>.
16. Седнин, А. В. О подходе к обработке данных для интеллектуальных систем централизованного теплоснабжения / А. В. Седнин, А. В. Жерело // *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>.
17. Effect of Operating Temperature Conditions in 21-Year-Old Insulated Pipe for a District Heating Network / J. Kim // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. Vol. 27. Art. 101265. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101265>.

Поступила 19.08.2024    Подписана в печать 23.10.2024    Опубликована онлайн 29.11.2024

#### REFERENCES

1. Lund H., Duic N., Østergaard P. A., Mathiesen B. V. (2018) Future District Heating Systems and Technologies: On the Role of Smart Energy Systems and 4th Generation District Heating. *Energy*, 165, 614–619. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.115>.
2. Sednin A. V., Dyussenov K. M. (2024) Development of Hybrid District Heating Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (2), 173–188. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-173-188> (in Russian).
3. El Mrabet S., Lamrani B., Abd-Lefdil M., Kouksou T. (2024) A Brief Overview of District Heating Pipe Network Progress. *Energy Conversion and Management: X*, 23, 100641. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100641>.
4. Luchkina L. V., Nikiforova G. G., Vasiliev V. G., Romanov S. V. (2019) Study of Physical and Mechanical Properties of Laboratory and Industrial Samples of Heat Insulating Materials Used for the Production of Pre-Insulated Pipes, fi Ttings and Polyurethane Shells. *Plasticheskie Massy*, (11–12), 50–55. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2019-11-12-50-55> (in Russian).
5. Weidlich I., Illguth M., Banushi G. (2018) Reserves in Axial Shear Strength of District Heating Pipes. *Energy Procedia*, 147, 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.037>.
6. EN 253 – 2020. *District Heating Pipes. Preinsulated Bonded Pipe Systems for Directly Buried Hot Water Networks. Pipe Assembly of Steel Service Pipe, Polyurethane*. European Committee for Standardization, 2020.
7. STB 2252-2012. *Steel Pipes, Previously Insulated with Polyurethane Foam. Technical Conditions*. Minsk, Gosstandart, Stroytechnorm, Minskiproekt, 2012. 18 (in Russian).
8. Status Assessment, Ageing, Lifetime Prediction and Asset Management of District Heating Pipes. The 18<sup>th</sup> International Symposium on District Heating and Cooling, September 3–6, 2023, Beijing, China.
9. Hay S., Leuteritz A., Morgenthum M. (2021) Remaining Service Life of Preinsulated Bonded Pipes—A Key Element of Transformation Strategies and Future District Heating Systems in Germany. *Energy Reports*, 7, 440–448. <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2021.08.084>.

10. Panteley N. V. (2018) Assessment of the State and Analysis of Damageability of Heating Grids Pipelines. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (2), 179–188. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-179-188> (in Russian).
11. Jakubowicz I. (2004) Research, Standardization and Practice in Accelerated Ageing Tests. *Polimery*, 49 (05), 321–325. <https://doi.org/10.14314/polimery.2004.321>.
12. Leuteritz A., Döring K.-D., Lampke T., Kuehnert I. (2016) Accelerated Ageing of Plastic Jacket Pipes for District Heating. *Polymer Testing*, 51, 142–147. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.03.012>.
13. Vega A., Yarahmadi N., Jakubowicz I. (2018) Optimal Conditions for Accelerated Thermal Ageing of District Heating Pipes. *Energy Procedia*, 149, 79–83. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.171>.
14. Vega A., Yarahmadi N., Jakubowicz I. (2020) Determining the Useful Life of District Heating Pipes: Correlation Between Natural and Accelerated Ageing. *Polymer Degradation and Stability*, 175, 109117. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109117>.
15. Leuteritz A., Döring K.-D., Lampke T., Kuehnert I. (2016) Accelerated Ageing of Plastic Jacket Pipes for District Heating. *Polymer Testing*, 51, 142–147. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.03.012>.
16. 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).
17. Kim J., Kim Y. S., Kim H., Yoon J. (2021) Effect of Operating Temperature Conditions in 21-Year-Old Insulated Pipe for a District Heating Network. *Case Studies in Thermal Engineering*, 27, 101265. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101265>.

**ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ,  
ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ «ЭНЕРГЕТИКА»  
в 2024 г.**

**I. ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ**

ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА

<b>Узаков Г. Н., Седнин В. А., Сафаров А. Б., Мамедов Р. А., Хатамов И. А.</b> CFD-моделирование аэродинамического профиля лопастей ветроэнергетической установки с вертикальной осью в системе Ansys Fluent .....	2
<b>Есман А. К., Зыков Г. Л., Потачиц В. А., Кулешов В. К.</b> Моделирование вертикальной тонкопленочной солнечной батареи при воздействии концентрированного солнечного излучения .....	5

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

<b>Брамм А. М., Матренин П. В., Попкова Н. А., Секацкий Д. А.</b> Прогнозирование коэффициента использования установленной мощности для объектов генерации на базе возобновляемых источников энергии для децентрализованных электроэнергетических систем .....	5
<b>Высоцкий М. Э.</b> Длительно допустимые токи нагрузки одножильных кабелей напряжением 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена различного конструктивного исполнения .....	4
<b>Высоцкий, М. Э.</b> Выбор конструктивного устройства кабельных линий напряжением 10 кВ по критерию минимума приведенных затрат .....	6
<b>Доброго К. В., Козначеев И. А., Червинский В. Л.</b> Моделирование пассивного сопряжения блоков гибридной системы накопления электроэнергии .....	3
<b>Доброго К. В., Фурсов С. А., Дубновицкий С. С., Червинский В. Л.</b> О методике расчета экономической эффективности применения систем накопления энергии .....	5
<b>Емельяничков В. И., Лойкуц Е. Э., Опейко О. Ф.</b> Электропривод и автоматизация пробоотборной системы газоанализатора дымовой трубы .....	3
<b>Новаш И. В., Румянцев В. Ю., Дерюгина Е. А., Булойчик Е. В., Конохов М. С.</b> Использование аварийных составляющих в качестве входных информационных сигналов микропроцессорных защит .....	2
<b>Павлович И. А., Барайшук С. М., Муродов М., Набиев М.</b> Способ внесения смесей для оптимизации заземления при монтаже вертикальных составных заземлителей .....	6
<b>Пехота А. Н., Галушко В. Н., Хрусталеv Б. М., Мирош Д. В.</b> Анализ электромагнитных и тепловых процессов асинхронного двигателя с помощью 3D-моделирования .....	2
<b>Редько С. В., Чубенко Е. Б., Бондаренко В. П., Никифоров И. В., Краков М. С.</b> Математическое и натурное моделирование режимов работы капиллярного эмиттера электростатического коллоидного микродвигателя .....	3
<b>Румянцев Ю. В., Романюк Ф. А., Румянцев В. Ю.</b> Быстродействующий метод определения амплитуды сигнала в микропроцессорных системах автоматизации и управления при колебаниях частоты .....	1
<b>Секацкий Д. А., Попкова Н. А.</b> Расчет и анализ удельных потерь активной мощно-	1

сти на коронирование в воздушных линиях электропередачи с учетом климатических данных . . . . .	
<b>Шклярский Я. Э., Лобко К. К., Кузнецова Ю. Н., Воробьев М. С.</b> Исследование составной двигательной нагрузки при наличии высших гармоник в электрической сети . . . . .	4

## ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

<b>Зеленуха Е. В., Цыганова А. А., Бельская Г. В., Хрипович А. А.</b> Обоснование использования биогаза для производства энергии в Республике Беларусь . . . . .	6
<b>Игнатович Р. С., Седнин В. А., Зуева Е. С.</b> Анализ и оптимизация режимов работы мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях профицита электроэнергетических мощностей в Объединенной энергетической системе Беларуси. Часть 1 . . . . .	3
<b>Игнатович Р. С., Седнин В. А., Зуева Е. С.</b> Анализ и оптимизация режимов работы мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях профицита электроэнергетических мощностей в Объединенной энергетической системе Беларуси. Часть 2 . . . . .	4
<b>Кулаков Г. Т., Воюш Н. В.</b> Структурно-параметрическая оптимизация регуляторов впрысков паровых котлов . . . . .	1
<b>Mitrofanov A. V., Vasilevich S. V., Stojko S. O.</b> Computational and Experimental Study of the Patterns of Formation of a Fluidized Bed of Inert Haydite Particles Material ( <b>Митрофанов А. В., Василевич С. В., Стойко С. О.</b> Расчетно-экспериментальное исследование закономерностей формирования кипящего слоя инертного керамзитового материала) . . . . .	4
<b>Ольшанский А. И., Голубев А. Н.</b> Обобщенные комплексные переменные кинетики сушки в расчетах длительности сушки плоских тонких влажных материалов . . . . .	4
<b>Ольшанский А. И., Котов А. А., Кузьменков С. М.</b> Температура в процессе конвективной сушки тонких плоских влажных материалов . . . . .	6
<b>Пехота А. Н., Хрусталева Б. М., Голубев В. П., Нгуен Тху Нга, Ву Минь Фап.</b> Разработка технологических вариантов использования различных отходов в качестве альтернативных источников энергии на основе многокомпонентных составов твердого топлива . . . . .	6
<b>Рыжова Т. В., Бухаров Д. Н., Аракелян М. М., Аракелян С. М.</b> Динамические процессы развития трещиноватости фрактального типа: модели для твердотельного материала камеры энергетической установки в процессе ее эксплуатации . . . . .	2
<b>Рыжова Т. В., Бухаров Д. Н., Аракелян М. М., Аракелян С. М.</b> Самопроизвольное зарастание трещиноватости в рабочих камерах энергетических газожидкостных тепловых установок – диффузионные динамические процессы . . . . .	4
<b>Седнин А. В., Дюсенов К. М.</b> Проблемы развития гибридных систем теплоснабжения . . . . .	2
<b>Седнин В. А., Седнин А. В., Бондарович А. И., Некало И. А., Мухин А. Д.</b> Анализ фактического состояния предизолированных трубопроводов систем централизованного теплоснабжения после эксплуатации . . . . .	6
<b>Струцкий Н. В., Романюк В. Н.</b> Организация электрохимической защиты стальных подземных трубопроводов от коррозии в газораспределительной отрасли Республики Беларусь . . . . .	3
<b>Струцкий Н. В., Романюк В. Н.</b> Оценка объемов работ по эксплуатационному контролю стальных подземных газопроводов с учетом организационно-логистического фактора . . . . .	2
<b>Сухоцкий А. Б.</b> Определение максимальной пропускной способности регулирую-	1

щего клапана в системах теплоснабжения . . . . .	
<b>Ярмольчик Ю. П., Шрёгер Р., Хаберфельнер Х., Пихлер М., Костич Д., Мороз Г. В.</b> Комбинированное сжигание потоков различных промышленных отходов в топках котлов. Часть 3 . . . . .	1

## ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

<b>Веремнюк В. В., Ивашечкин В. В., Крицкая В. И.</b> Методика гидравлического расчета групповых скважинных водозаборов с парными сборными водоводами . . . . .	3
<b>Кромм Г. А., Дробницкий Н. А., Волков А. В., Дружинин А. А., Ляпин В. Ю., Трулёв А. В., Качанов И. В., Бровка Г. М.</b> Повышение эффективности погружных многоступенчатых насосов на основе гидрофобизации поверхностей проточной части . . . . .	5
<b>Филимонова А. А., Власова А. Ю., Карницкий Н. Б., Чичирова Н. Д., Камалиева Р. Ф.</b> Промышленное апробирование гибридной технологии очистки воды из реки Оки методом углевания с порошкообразным сорбентом . . . . .	5

## ЭКОНОМИКА ЭНЕРГЕТИКА

<b>Любчик О. А., Пинаев В. Е., Ухова В. Н.</b> Особенности углеродного регулирования в Республике Беларусь и Российской Федерации: сравнительный анализ и тенденции . . . . .	5
<b>Сантов С. Р., Чичирова Н. Д., Филимонова А. А., Карницкий Н. Б.</b> Прогнозирование часов пик энергопотребления региональных энергосистем . . . . .	1

## II. ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

## А

Аракелян М. М., 2, 4  
Аракелян С. М., 2, 4

## Б

Барайшук С. М., 6  
Бельская Г. В., 6  
Бондарович А. И., 6  
Бондаренко В. П., 3  
Брамм А. М., 5  
Бровка Г. М., 5  
Булойчик Е. В., 2  
Бухаров Д. Н., 2, 4

## В

Василевич С. В., 4  
Верременюк В. В., 3  
Власова А. Ю., 5  
Волков А. В., 5  
Воробьев М. С., 4  
Воюш Н. В., 1  
Ву Минь Фап, 6  
Высоцкий М. Э., 4, 6

## Г

Галушко В. Н., 2  
Голубев А. Н., 4  
Голубев В. П., 6

## Д

Дерюгина Е. А., 2  
Доброго К. В., 3, 5  
Дробницкий Н. А., 5  
Дружинин А. А., 5  
Дубновицкий С. С., 5  
Дюсенов К. М., 2

## Е

Емельянчиков В. И., 3  
Есман А. К., 5

## З

Зуева Е. С., 3, 4  
Зыков Г. Л., 5  
Зеленухо Е. В., 6

## И

Ивашечкин В. В., 3  
Игнатович Р. С., 3, 4

## К

Камалиева Р. Ф., 5  
Карницкий Н. Б., 1, 5  
Качанов И. В., 5  
Козначеев И. А., 3  
Конохов М. С., 2  
Костич Д., 1  
Котов А. А., 6  
Краков М. С., 3  
Крицкая В. И., 3  
Кромм Г. А., 5  
Кузнецова Ю. Н., 4  
Кузьменков С. М., 6  
Кулаков Г. Т., 1  
Кулешов В. К., 5

## Л

Лобко К. К., 4  
Лойкуц Е. Э., 3  
Любчик О. А., 5  
Ляпин В. Ю., 5

## М

Мамедов Р. А., 2  
Матренин П. В., 5  
Мирош Д. В., 2  
Митрофанов А. В., 4  
Мороз Г. В., 1  
Муродов М., 6  
Мухин А. Д., 6

## Н

Набиев М., 6  
Нгуен Тху Нга, 6  
Некало И. А., 6  
Никифоров И. В., 3  
Новаш И. В., 2

## О

Ольшанский А. И., 4, 6  
Опейко О. Ф., 3

## П

Павлович И. А., 6  
Пехота А. Н., 2, 6  
Пинаев В. Е., 5  
Пихлер М., 1

Попкова Н. А., 1, 5  
Потачиц В. А., 5

**Р**

Редько С. В., 3  
Романюк В. Н., 2, 3  
Романюк Ф. А., 1  
Румянцев В. Ю., 1, 2  
Румянцев Ю. В., 1  
Рыжова Т. В., 2, 4

**С**

Саитов С. Р., 1  
Сафаров А. Б., 2  
Седнин А. В., 2, 6  
Седнин В. А., 2, 3, 4, 6  
Секацкий Д. А., 1, 5  
Стойко С. О., 4  
Струцкий Н. В., 2, 3  
Сухоцкий А. Б., 1

**Т**

Трулёв А. В., 5

**У**

Узаков Г. Н., 2  
Ухова В. Н., 5

**Ф**

Филимонова А. А., 1, 5  
Фурсов С. А., 5

**Х**

Хаберфельнер Х., 1  
Хатамов И. А., 2  
Хрипович А. А., 6  
Хрусталеv Б. М., 2, 6

**Ц**

Цыганова А. А., 6

**Ч**

Червинский В. Л., 3, 5  
Чичирова Н. Д., 1, 5  
Чубенко Е. Б., 3

**Ш**

Шклярский Я. Э., 4  
Шрёгер Р., 1

**Я**

Ярмольчик Ю. П., 1