

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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 68, № 5
2025

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Серенков П. С., Романчак В. М., Богуславский С. И., Селятыцкий А. А., Климкович П. И., Картавец А. В., Старовойтов И. В. Комплекс методов прогнозирования метрологической исправности приборов учета электрической энергии	389
Мурадалиев А. З., Исмаилова С. М. Повышение эффективности диагностики состояния силовых трансформаторов	403
Высоцкий М. Э. Выбор схемы заземления экранов силовых кабельных линий	417

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Корсак Е. П., Романко В. А. Имитационное моделирование и вероятностный анализ безопасности в управлении рисками АЭС	428
Зеленуха Е. В., Цыганова А. А., Бельская Г. В. Биогаз и свалочный газ как источники возобновляемой энергии в Республике Беларусь	442
Ольшанский А. И., Голубев А. Н. Исследования конвективной сушки тонких и толстых влажных материалов	457

Главный редактор Александр Михайлович Маляревич

Редакционная коллегия

- В. Ю. РУМЯНЦЕВ* (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. ЖУКОВСКИЙ (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
В. В. ИВАШЕЧКИН (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
А. С. КАЛИНИЧЕНКО (Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь),
А. КОННОВ (Университет Лунда, Швеция),
Х. МАХКАМОВ (Университет Нортумбрии, Великобритания),
А. А. МИХАЛЕВИЧ (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
НГО ТУАН КИЕТ (Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
Е. Н. ПИСЬМЕННЫЙ (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),
Ф. А. РОМАНЮК (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
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),
Г. Н. УЗАКОВ (Каршинский инженерно-экономический институт, Карши, Республика Узбекистан),
Б. М. ХРУСТАЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Л. В. ШЕНЕЦ (РУП «Белинвестэнергобережение», 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 30.09.2025. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 11, 5. Уч.-изд. л. 8,74. Тираж экз.
Дата выхода в свет . 2025. Заказ .

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

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

© Белорусский национальный технический университет, 2025

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

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 68, No 5
2025

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

CONTENTS

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

Serenkov P. S., Romanchack V. M., Boguslawski S. I., Seliatytski A. A., Klimko- vich P. I., Kartavtsev A. V., Staravoitau I. V. A Set of Methods for Predicting the Met- rological Service-ability of Electricity Meters	389
Muradaliyev A. Z., Ismailova S. M. Increasing the Efficiency of Power Transfor- mer Condition Diagnostics	403
Vysotski M. E. Selecting a Grounding Scheme for Screens of Power Cable Lines . . .	417

HEAT POWER ENGINEERING

Korsak K. P., Romanko V. A. Simulation Modeling and Probabilistic Safety Ana- lysis in Nuclear Power Plant Risk Management	428
Zelianukha A. V., Tsyhanava H. A., Belskaya H. V. Biogas and Landfill Gas as Sources of Renewable Energy in the Republic of Belarus	442
Ol'shanskii A. I., Golubev A. N. Investigations of Convective Drying of Thin and Thick Wet Materials	457

Editor-in-Chief Aliaksandr M. Maliarevich

Editorial Board

- V. Yu. RUMIANTSEV* (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),
- 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),
- 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, 19th
Reg. No 1257**

Passed for printing 30.09.2025. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 11,5.
An edition of copies. Date of publishing 2025. Order list .

ADDRESS

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

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

© Belarusian National Technical University, 2025

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-389-402>

УДК 535.6

Комплекс методов прогнозирования метрологической исправности приборов учета электрической энергии

П. С. Серенков¹⁾, В. М. Романчук¹⁾, С. И. Богуславский¹⁾, А. А. Селятыцкий¹⁾,
П. И. Климкович¹⁾, А. В. Картавец²⁾, И. В. Старовойтов²⁾

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

²⁾Филиал «Предприятие средств диспетчерского и технологического управления»

РУП «Гродноэнерго» (Гродно, Республика Беларусь)

Реферат. Рассмотрены вопросы совершенствования методов оценки и прогнозирования метрологической исправности приборов учета электрической энергии, характеризуемой значением межповерочного интервала с заданной вероятностью. Приведен анализ общепринятой методики оценки межповерочных интервалов средств измерений по РМГ 74–2004 с позиций корректности, оперативности, прозрачности. Установлено, что предложенная в РМГ 74–2004 модель дрейфа метрологических характеристик подконтрольной партии средств измерений (СИ) как модель регрессии является интерполяционной, т. е. определяет межповерочный интервал, который должен быть в период между начальной и текущей поверками, и поэтому не является прогнозной по факту. Обоснована необходимость разработки экстраполяционной модели дрейфа метрологических характеристик и соответствующая методика прогнозирования межповерочных интервалов, основанная на методах статистического анализа временных рядов. Выделены два возможных способа определения межповерочных интервалов приборов учета электрической энергии – по количественному и альтернативному признакам. Для каждого способа предложены модели экстраполяции дрейфа метрологических характеристик подконтрольной выборки средств измерений. Для прогнозирования межповерочных интервалов по количественному признаку обоснована комбинированная модель дрейфа, в которой дрейф математического ожидания погрешностей приборов учета в выборке описывается линейной моделью, а дрейф среднего квадратического отклонения погрешностей – экспоненциальной моделью. Для прогнозирования межповерочных интервалов по альтернативному признаку обосновано одновременное рассмотрение двух моделей дрейфа. Дрейф математического ожидания погрешностей приборов учета в выборке описывается моделью «линейного» случайного процесса, при этом среднее квадратическое отклонение погрешностей постоянно. Дрейф среднего квадратического отклонения погрешностей СИ в выборке описывается моделью «веерного» случайного процесса, при этом математическое ожидание погрешностей постоянно. Прогнозируемое значение межповерочного интервала определяется как меньшее значение результатов двух моделей. Предложенный подход обеспечивает достаточную достоверность прогноза межповерочного интервала приборов учета электроэнергии на основе минимум двух поверок подконтрольной партии СИ (первичной и первой периодической).

Ключевые слова: приборы учета электрической энергии, межповерочный интервал, экстраполяционная модель дрейфа

Для цитирования: Комплекс методов прогнозирования метрологической исправности приборов учета электрической энергии / П. С. Серенков [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 5. С. 389–402. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-389-402>

Адрес для переписки

Серенков Павел Степанович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 331-11-20
pavelserenkov@bntu.by

Address for correspondence

Serenkov Pavel S.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosti Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 17 331-11-20
pavelserenkov@bntu.by

A Set of Methods for Predicting the Metrological Service-ability of Electricity Meters

P. S. Serenkov¹⁾, V. M. Romanchack¹⁾, S. I. Boguslawski¹⁾, A. A. Seliatytski¹⁾,
P. I. Klimkovich¹⁾, A. V. Kartavtsev²⁾, I. V. Staravoitau²⁾

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

²⁾«Enterprise of Dispatch and Technological Control Facilities», Branch of RUE

[Republican Unitary Enterprise] «Grodnoenergo» (Grodno, Republic of Belarus)

Abstract. The issues of improving the methods for assessing and predicting the metrological serviceability of electric energy meters, characterized by the value of the inter-verification interval with a given probability, are considered. The paper presents an analysis of the generally accepted methodology for assessing inter-verification intervals of measuring instruments according to PMГ [RMG] 74–2004 from the standpoint of correctness, efficiency, and transparency. It has been established that the model of drift of metrological characteristics of a controlled batch of measuring instruments (MI) proposed in PMГ [RMG] 74–2004, as a regression model, is an interpolation model, i.e. it determines the inter-verification interval that should be in the period between the initial and current verifications, and therefore is not predictive in fact. The necessity of developing an extrapolation model of the drift of metrological characteristics and a corresponding methodology for predicting inter-verification intervals based on methods of statistical analysis of time series is substantiated. Two possible methods for determining inter-verification intervals of electricity meters have been identified: by quantitative and alternative criteria. For each method, models for extrapolating the drift of metrological characteristics of a controlled sample of measuring instruments are proposed. To predict inter-verification intervals based on a quantitative feature, a combined drift model is justified, in which the drift of the mathematical expectation of errors of metering devices in a sample is described by a linear model, and the drift of the mean square deviation of errors is described by an exponential model. To predict inter-verification intervals based on an alternative criterion, the simultaneous consideration of two drift models is justified. The drift of the mathematical expectation of errors of metering devices in the sample is described by the model of a “linear” random process, while the standard deviation of errors is constant. The drift of the standard deviation of the errors of the measuring instruments in the sample is described by the model of a “fan” random process, while the mathematical expectation of the errors is constant. The predicted value of the inter-verification interval is defined as the smaller value of the results of the two models. The proposed approach ensures sufficient reliability of the forecast of the inter-verification interval of electricity meters based on at least two verifications of the controlled batch of measuring instruments (primary and first periodic).

Keywords: electrical energy metering devices, inter-verification interval, extrapolation drift model

For citation: Serenkov P. S., Romanchack V. M., Boguslawski S. I., Seliatytski A. A., Klimkovich P. I., Kartavtsev A. V., Staravoitau I. V. (2025) A Set of Methods for Predicting the Metrological Service-ability of Electricity Meters // *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (5), 389–402. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-389-402> (in Russian)

Введение

Объектом исследования являются приборы учета электрической энергии производства филиала «Предприятие средств диспетчерского и технологического управления» РУП «Гродноэнерго»:

– счетчики электрической энергии однофазные многофункциональные «Гран-Электро СС-101»,

– счетчики электрической энергии переменного тока статические «Гран-Электро СС-301».

Одним из ключевых показателей качества счетчиков как средств измерений (СИ) массового использования является их метрологическая надежность, важнейшей характеристикой которой выступает межповерочный интервал (МПИ), обеспечивающий метрологическую исправность СИ с заданной вероятностью $P_{\text{ми}}(t)$ [1, 2].

В сфере законодательной метрологии МПИ СИ контролирует Госстандарт Республики Беларусь в соответствии с законом об обеспечении единства измерения [1]. Методика и порядок определения и корректировки МПИ регламентированы, основаны на теории метрологической надежности Фридмана А. Э. [2–5].

Недостатки подхода, изложенного в [2], вытекают из специфической сложной процедуры:

– формирования модели аппроксимации дрейфа метрологической характеристики (МХ) средств измерений в партии как регрессионной модели $P_{\text{ми}}(t)$ от времени эксплуатации;

– итерационного решения регрессионной модели $P_{\text{ми}}(t)$ средств измерений в партии, в которой в неявном виде «защит» МПИ T , по критерию $P_{\text{ми}}(t) > P_{\text{ми}}^*$ [2–4].

Главный недостаток подхода заключается в том, что предложенная в [2] модель дрейфа МХ СИ как модель регрессии является интерполяционной, т. е. определяет МПИ, который распространяется на период между начальной и текущей поверками. Иными словами, модель отвечает корректно на вопрос, какой должен быть МПИ в период между начальной и текущей поверками, минимально соответствующий критерию метрологической надежности ($P_{\text{ми}}^*$). То есть по факту модель дрейфа (2) не является прогнозной [6].

Для этих целей необходима экстраполяционная модель дрейфа [7–10]. Для ее достижения предложена методика, альтернативная методике [2], в основу которой положены методы статистического анализа временных рядов.

По результатам анализа рекомендаций [2, 3] существуют два способа определения показателей метрологической надежности СИ и прогнозирования МПИ (рис. 1):

- по количественному признаку,
- по альтернативному признаку.

Способ оценки межповерочного интервала по количественному признаку

Показатели метрологической надежности и оценки МПИ производятся на основании данных о действительных погрешностях единиц СИ в партии, выявленных в процессе либо специальных подконтрольных испытаний, либо предыдущей поверки (поверок).

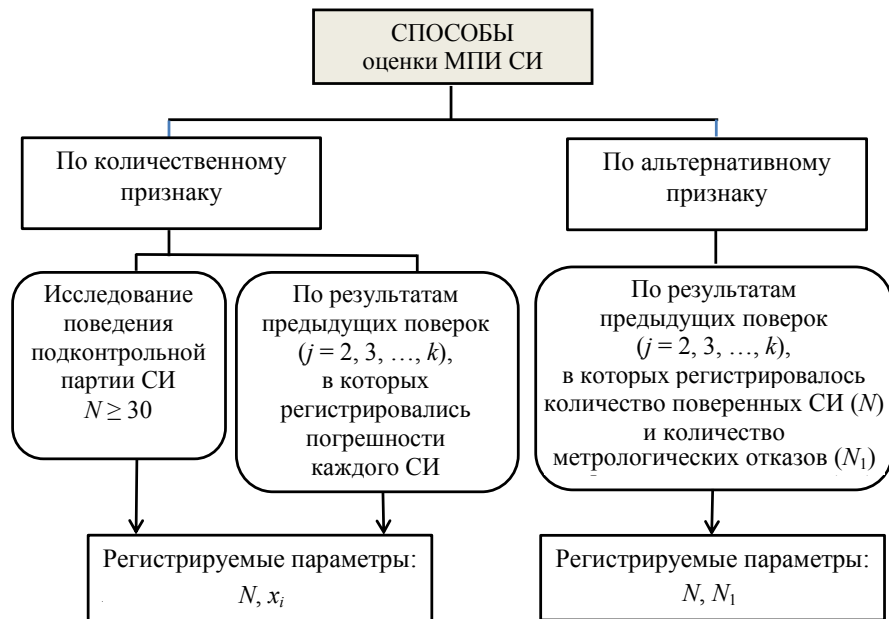


Рис. 1. Способы определения показателей метрологической надежности средств измерений и прогнозирования межповерочного интервала

Fig. 1. Methods for determining the indicators of metrological reliability of measuring instruments and predicting the inter-verification interval

Установлено, что корректнее использовать комбинированную модель дрейфа, так как в ней может быть синергетический эффект совместного проявления $m(t)$ и $\sigma(t)$.

Комбинированная модель дрейфа x_i (деградации) в подконтрольной партии СИ представляет собой математическую модель поведения верхней $V_1(t)$ и нижней $V_2(t)$ границ интервала погрешности как случайной величины с доверительной вероятностью p (примем $p = 0,95$) (рис. 2).

Прогнозируемый МПИ T соответствует ближайшей точке пересечения одной из линий $V_1(t)$ или $V_2(t)$ с линиями пределов основной погрешности средства измерения $\pm\Delta$. Для определения времени эксплуатации до выхода интервала погрешности измерений за границы поля допуска $\pm\Delta$ необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{aligned} +\Delta &= V_1(t); \\ -\Delta &= V_2(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Соответственно решениями обоих уравнений являются T_1 и T_2 – расчетные значения времени эксплуатации СИ до момента выхода x_i за верхнюю и соответственно нижнюю границы Δ с вероятностью $p = 0,95$. Искомым значением МПИ является $T = \min(T_1, T_2)$.

В общем виде модель дрейфа $V_1(t)$ или $V_2(t)$ от времени для всей подконтрольной выборки СИ может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} V_1(t) &= m(t) + kv(t); \\ V_2(t) &= m(t) - kv(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где $m(t)$ – дрейф математического ожидания погрешностей измерений x_i СИ в выборке; $v(t)$ – дрейф среднего квадратического отклонения (СКО) погрешностей измерений x_i СИ в выборке; k – коэффициент расширения для уровня доверительной вероятности p .

В результате задача прогнозирования МПИ сводится к выбору типа и определению функций дрейфов $m(t)$ и $v(t)$.

Простейшей, часто используемой моделью изменения метрологической характеристики СИ $\delta(t)$ является линейная модель типа

$$\delta(t) = x_0 + t\Delta x,$$

где x_0 – начальное значение метрологической характеристики СИ, зарегистрированное в результате первичной поверки; Δx – скорость изменения x_0 во времени (рис. 2).

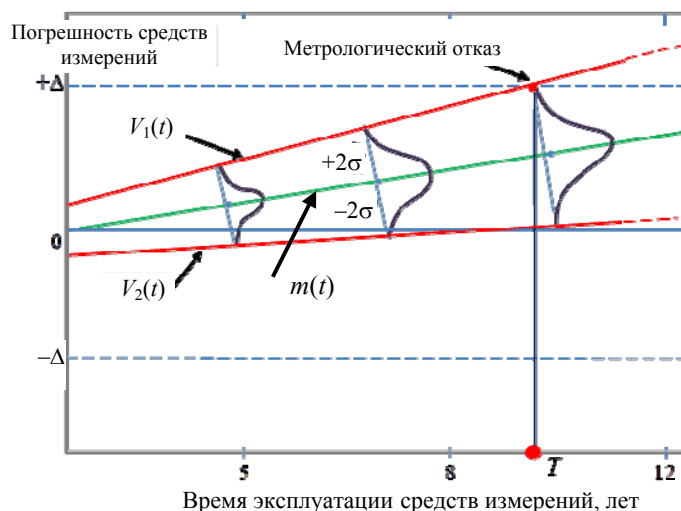


Рис. 2. Комбинированная модель линейного типа в соответствии с [2]

Fig. 2. Combined linear type model in accordance with [2]

Подобного рода линейная модель применена в РМГ 74–2004 в отношении как математического ожидания $m(t)$, так и СКО $v(t)$ погрешностей измерений x_i СИ в выборке.

Как показали проведенные исследования, линейная модель удовлетворительно описывает деградацию точностных характеристик СИ в период эксплуатации от одного до пяти лет [5, 8]. Использование ее в других временных диапазонах (более 5 лет) некорректно ввиду явного противоречия между расчетными и экспериментальными значениями частоты отказов.

Данный аспект является сегодня достаточно актуальным в силу динамического заполнения рынка электронными СИ, практически не имеющими механических узлов, МПИ которых свыше 5 лет. Примером могут служить приборы учета электрической энергии типа СС-101, СС-301, установленный МПИ для которых $T = 8$ лет.

В результате анализа литературных источников и данных о результатах поверки счетчиков типа СС-101, СС-301 за период порядка 20 лет для корректного описания поведения (дрейфа) систематической и случайной составляющей погрешности СИ во времени принята следующая концепция комбинированной экстраполяционной модели деградации СИ (рис. 3):

– дрейф математического ожидания погрешностей измерений x_i СИ в выборке линейная модель типа

$$m(t) = x_0 + \Delta x t, \quad (3)$$

где x_0 – начальное значение метрологической характеристики СИ, зарегистрированное в результате первичной поверки; Δx – скорость изменения x_0 во времени, вычисляется как

$$\Delta x = x_1 - x_0,$$

где x_1 – значение математического ожидания погрешностей x_i СИ в подконтрольной партии, зарегистрированное в результате первой периодической поверки;

– дрейф СКО погрешностей измерений x_i СИ в выборке экспоненциальная модель типа

$$v(t) = k \sigma_0 \exp(t \lambda), \quad (4)$$

где $\lambda = \ln(\Delta \sigma / \sigma_0 + 1)$; k – коэффициент расширения, зависящий от уровня доверия p ; σ_0 – СКО в начальной точке (по результатам первичной поверки); $\Delta \sigma$ – скорость изменения СКО, вычисляется как

$$\Delta \sigma = \sigma_1 - \sigma_0,$$

где σ_1 – значение метрологической характеристики СИ, зарегистрированное в результате первой периодической поверки.

Для определения значения МПИ как времени эксплуатации до выхода интервала погрешности измерений за границы поля допуска $\pm \Delta$ с вероятностью $p = 0,95$ необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{aligned} +\Delta &= V_1(t) = (x_0 + \Delta x t) + k \sigma_0 \exp(t \lambda); \\ -\Delta &= V_2(t) = (x_0 + \Delta x t) - k \sigma_0 \exp(t \lambda). \end{aligned} \quad (5)$$

Соответственно решениями обоих уравнений являются расчетные значения времени эксплуатации СИ T_1 и T_2 (рис. 3) [11–14]. Искомым значением МПИ является $T = \min(T_1, T_2)$.

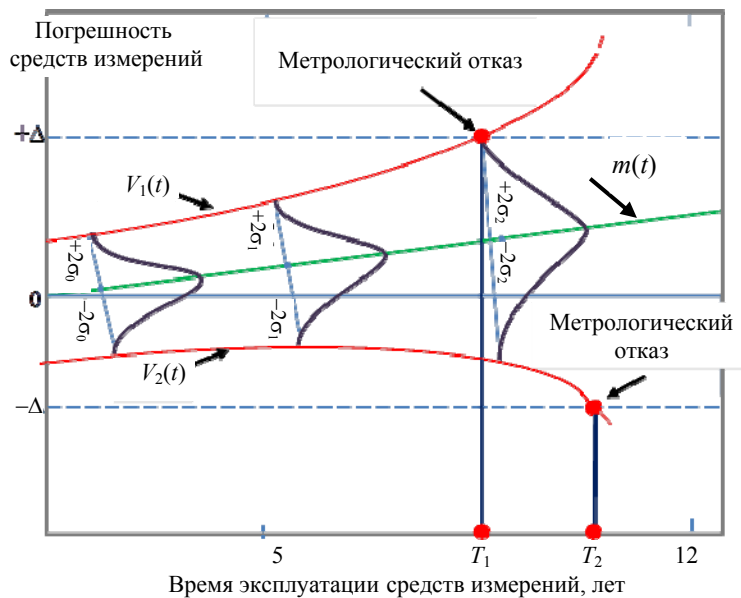


Рис. 3. Комбинированная модель типа: дрейф математического ожидания погрешностей измерений x_i в выборке линейная модель, дрейф СКО погрешностей измерений x_i в выборке экспоненциальная модель

Fig. 3. Combined model type: drift of the mathematical expectation of measurement errors x_i in a sample linear model, drift of the standard deviation of measurement errors x_i in a sample linear model

Преимущества обоснованной предлагаемой методики:

1. Методика использует корректную, понятную математическую экстраполяционную модель временного ряда, позволяющую в явном виде прогнозировать МПИ T .

2. Методика обеспечивает высокую оперативность получения информации для прогнозного расчета МПИ T . Априорно выбранный характер типов моделей $m(t)$ и $v(t)$, формирующих комбинированные модели $V_1(t)$ и $V_2(t)$, основанный на анализе и обобщении существующей теории и практики деградации технических объектов во времени, обеспечивает достаточную достоверность прогноза поведения метрологической характеристики СИ на основе минимум двух проверок подконтрольной партии СИ (первичной и первой периодической).

Примечание. Методика корректировки МПИ СИ по [2] предполагает наличие результатов минимум по трем поверкам, включая первичную.

3. Методика обеспечивает возможность малозатратного мониторинга метрологической надежности исследуемых СИ и принятия эффективных решений, связанных с конструктивными особенностями и технологией их изготовления в ближайшей перспективе (по данным двух проверок).

Например, по результатам первой периодической проверки подконтрольной выборки СИ установлено расчетное значение МПИ $T_{\text{расч}} = 15$ лет. В Республике Беларусь для данного типа СИ установлен МПИ $T_{\text{уст}} = 8$ лет.

Производитель не планирует поставки СИ на экспорт. В текущей перспективе с учетом $T_{\text{расч}} > T_{\text{уст}}$ производитель может пересмотреть систему производства с позиций максимальной эффективности:

- упростить технологические процессы производства;
- упростить конструкцию СИ;
- приобретать более доступные (дешевые) комплектующие и т. п.

При этом потребитель в пассивном режиме (от поверки к поверке) может организовать оценку и мониторинг прогнозных значений МПИ $T_{j,\text{расч}}$ после каждой очередной j -й периодической поверки и имеет возможность принимать адекватные управленческие решения в отношении коррекции системы производства в сторону как ужесточения требований, так и ослабления.

Пример оценки межповерочного интервала приборов учета электрической энергии по количественному признаку

Расчет времени эксплуатации приборов учета типа СС-301-5.1/U/M в подконтрольной выборке $N = 30$ шт. в соответствии с выражениями (5)–(7) представим графически (рис. 4). Прогнозное время поддержания метрологической надежности приборов учета СС-301-5.1/U/M составляет $T = 11$ лет, что и можно рассматривать как очередной МПИ для партии СИ.

Выборка $N = 30$; 1, 2 – пределы допустимой относительной погрешности счетчиков; $\Delta = \pm 1\%$; 3 – линейная аппроксимация дрейфа математического ожидания m_i погрешностей счетчиков в подконтрольной партии x_i ; 4, 5 – верхняя (V_1) и нижняя (V_2) границы прогнозируемой оценки интервала относительной погрешности счетчиков с вероятностью $p = 0,95$.

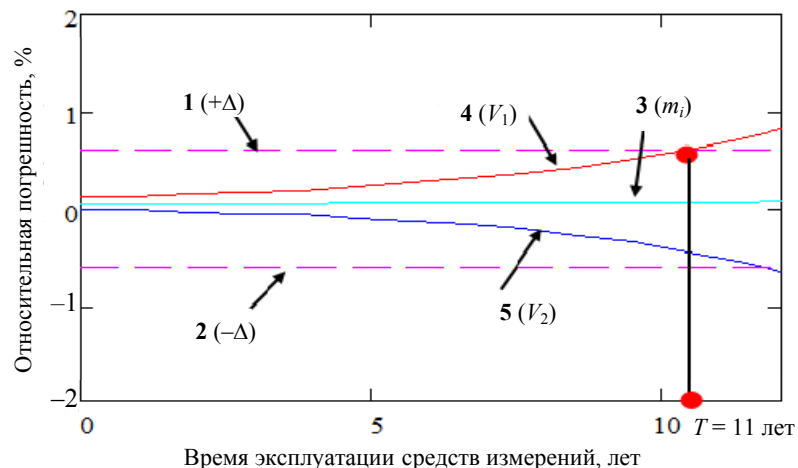


Рис. 4. Аппроксимация зависимости статистических характеристик относительной погрешности СИ выборки N от времени эксплуатации по результатам первой и второй поверок [11]

Fig. 4. Approximation of the dependence of statistical characteristics of the relative error of the measuring instrument of sample N on the operating time based on the results of the first and second checks [11]

Способ оценки межповерочного интервала по альтернативному признаку

Способ предполагает, что показатели метрологической надежности и оценки МПИ производятся на основании статистических данных о количестве СИ конкретного типа, прошедших и не прошедших плановую поверку.

Способ определения показателей метрологической надежности СИ и прогнозирования МПИ по альтернативному признаку, очевидно, менее информативный, но достаточно экономичный, так как не требует дополнительных расходов на испытания подконтрольной партии или сбор, предварительную обработку и обобщение количественной информации о действительных погрешностях СИ партии. Именно экономичность делает способ по альтернативному признаку достаточно привлекательным для мониторинга и прогнозирования значений МПИ СИ конкретного типа для целей совершенствования конструкции и (или) технологии изготовления СИ.

Для повышения доверия к способу определения показателей метрологической надежности СИ по альтернативному признаку нами на основе рекомендаций РМГ 74–2004 разработаны метод и алгоритм его реализации, обеспечивающие приемлемую достоверность результатов.

Для решения задачи об аппроксимации изменения математического ожидания и СКО погрешности СИ по статистическим данным результатов двух поверок (начальной и через промежуток времени T , лет) используются по аналогии с [2] одновременно две модели – «линейного» и «веерного» случайного процесса.

1. Модель «веерного» случайного процесса.

Предполагается, что погрешность СИ описывается нормальным распределением с нулевым математическим ожиданием $m(t)$ и линейно растущим средним квадратическим отклонением $\sigma(t)$, т. е. с течением времени эксплуатации увеличивается только разброс погрешности СИ в партии

$$m(t) = 0, \sigma(t) = \sigma(0) + bt,$$

где σ_0 – начальное СКО (на момент первичной поверки); b – коэффициент дрейфа СКО.

Для решения задачи об аппроксимации СКО погрешности СИ в партии по результатам двух поверок (начальной и через промежуток времени T , лет) выполняются следующие шаги:

1.1. Начальная (первичная) поверка ($t = 0$).

Фиксируется предел допустимой погрешности СИ Δ , заданный в технической документации. Вычисляется СКО $\sigma(0) = \Delta / 3$.

1.2. Вторая поверка через время $t = T$.

Вычисляется СКО на момент времени $t = T$

$$\sigma(T) = \frac{\Delta}{\lambda_{0.5(1+p_1)}},$$

где p_1 – доверительная вероятность для второй поверки; $\lambda_{0.5(1+p_1)} = \Phi^{-1}((p_1 + 1)/2)$ – квантиль нормального распределения для уровня вероятности $(p_1 + 1)/2$.

1.3. Расчет коэффициента дрейфа СКО b

$$b = \sigma^2(T) - \sigma^2(0).$$

1.4. Вероятность бездефектной работы $p(t)$.

Вероятность $p(t)$ того, что по истечении времени эксплуатации t погрешность СИ не превысит допустимый предел Δ , рассчитывается по формуле

$$p(t) = \Phi\left(\frac{\Delta - m(0)}{\sigma(t)}\right) - \Phi\left(\frac{-\Delta - m(0)}{\sigma(t)}\right), \quad (6)$$

где $p(t)$ – вероятность бездефектной работы в момент времени t ; t – время после выполнения первой поверки; Φ – функция стандартного нормального распределения; $m(0) = 0$; предположение о равенстве нулю математического ожидания в момент времени $t = 0$.

1.5. Расчет МПИ T_1 для риска потребителя $\beta = 0,05$.

Время T_1 , в течение которого СИ сохраняет работоспособность с вероятностью 0,95, находится из уравнения

$$p(T_1) = \beta,$$

где $p(T_1)$ рассчитывается в соответствии с (1).

Пример расчета. Исходные данные: $N_0 = 21100$ (0) – число исправных (дефектных) счетчиков на момент времени $t = 0$ (начальная поверка); $N_1 = 20908$ (192) – то же на момент времени $t = T$ (вторая поверка); $\Delta = \pm 1\%$ – предел допустимой погрешности СИ.

Вычисляем вероятности:

$$p_0 = 1; \quad p_1 = N_1 / N_0 = 0,991.$$

Вычисляем СКО:

$$\sigma(0) = \Delta / 3 = 1/3 = 0,333;$$

$$\sigma(T) = \frac{\Delta}{\lambda_{0,5(1+p_1)}} = \frac{1}{2,608} = 0,383, \quad \text{где } \lambda_{0,5(1+p_1)} = 2,608.$$

Решаем уравнение $p(T_1) = \beta$ (рис. 5), получаем: $T_{\text{назначенное}} = 9,5$ года; $T_{\text{расчетное}} = 39,5$ года.

2. Модель «линейного» случайного процесса.

Предполагается, что погрешность СИ описывается нормальным распределением с постоянным СКО $\sigma(t)$ и линейно растущим математическим ожиданием $m(t)$, т. е. с течением времени эксплуатации увеличивается только систематическая составляющая погрешности СИ в партии (дрейф среднего значения):

$$\sigma(t) = \sigma(0); \quad m(t) = m(0) + k \frac{t}{T},$$

где m_0 – начальное математическое ожидание погрешности СИ в партии (на момент первичной поверки); k – коэффициент дрейфа математического ожидания.

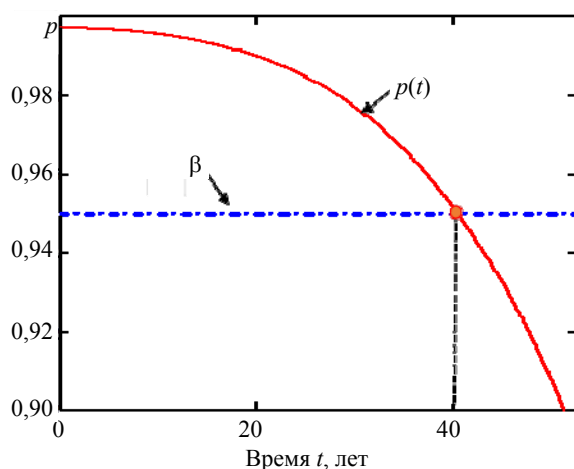


Рис. 5. Графическая интерпретация решения уравнения $p(T_1) = \beta$

Fig. 5. Graphical interpretation of the solution of the equation $p(T_1) = \beta$

Для решения задачи об аппроксимации математического ожидания погрешности СИ по результатам двух поверок (начальной и через промежуток времени T , лет) выполняются следующие шаги.

2.1. Начальная поверка ($t = 0$).

Предполагается: $m(0) = 0$; $\sigma(0) = \Delta/3$.

2.2. Вторая поверка через время $t = T$.

Находим статистические оценки параметров дрейфа погрешности СИ в партии

$$m(T) = \Delta - \lambda_{p1} \sigma(0),$$

где $\lambda_{p1} = \Phi^{-1}(p_1)$ – квантиль нормального распределения для уровня вероятности p_1 .

2.3. Расчет коэффициента дрейфа математического ожидания k

$$k = m(t).$$

2.4. Вероятность бездефектной работы $p(t)$.

Вероятность $p(t)$ того, что по истечении времени эксплуатации погрешность СИ в партии не превысит допустимый предел Δ , рассчитывается по формуле

$$p(t) = \Phi\left(\frac{\Delta - m(t)}{\sigma(0)}\right) - \Phi\left(\frac{-\Delta - m(t)}{\sigma(0)}\right), \quad (7)$$

где $p(t)$ – вероятность бездефектной работы в момент времени t ; t – время после выполнения первой поверки; Φ – функция стандартного нормального распределения; $\sigma(t) = \sigma(0)$ – предположение о постоянстве СКО.

2.5. Расчет МПИ T_2 для риска потребителя $\beta = 0,05$.

Время T_2 , в течение которого СИ сохраняет работоспособность с вероятностью 0,95, находится из уравнения

$$p(T_2) = \beta,$$

где $p(T_2)$ рассчитывается в соответствии с (2).

Пример расчета. Исходные данные: $N_0 = 21100$ (0) – число исправных (дефектных) счетчиков (начальная поверка); $N_1 = 20908$ (192) – то же, поверка через время T ; $\Delta = \pm 1\%$ – предел допустимой погрешности СИ,

Вычисляем вероятности: $p_0 = 1$; $p_1 = N_1 / N_0 = 0,991$.

Вычисляем СКО и математическое ожидание:

$$\sigma(0) = \Delta / 3 = 0,333, m(0) = 0,0.$$

$$m(T) = \Delta - \lambda_{p1}\sigma(0), \text{ где } \lambda_{p1} = 2,362.$$

Решаем уравнение $p(T_2) = \beta$ (рис. 5), получаем: $T_{2\text{назначенное}} = 9,5$ года, $T_{2\text{расчетное}} = 20,1$ года.

ВЫВОДЫ

1. Анализ общепринятых методик оценки приборов учета электроэнергии с позиций корректности, оперативности, прозрачности позволил установить, что используемая модель аппроксимации дрейфа их метрологических характеристик имеет ряд недостатков. Установлены причины возросшего в современных условиях интереса производителей и потребителей приборов учета в периодическом оценивании, мониторинге, анализе и пересмотре их межповерочных интервалов. Для двух возможных способов определения межповерочных интервалов приборов обоснованы модели экстраполяции дрейфа метрологических характеристик подконтрольной выборки и соответствующие методики оценки межповерочных интервалов с заданной вероятностью. Предложенные методы обеспечивают достаточную достоверность прогноза межповерочного интервала приборов учета электроэнергии на основе минимум двух поверок подконтрольной партии СИ (первичной и первой периодической), в то время как общепринятые методы основываются на данных минимум трех поверок.

2. По результатам двух расчетов принимаем решение: $T = \min(T_1, T_2) = 20,1$ года. Результаты прогноза МПИ альтернативным методом показывают существенное различие оценок T_1 (39 лет) и T_2 (20 лет) при $T_{\text{назначенное}} = 9,5$ года, что свидетельствует о следующем:

– деградация статических одно- и трехфазных счетчиков электроэнергии с цифровым выходом типа СС-301 и СС-101 по характеристике «СКО погрешностей в партии СИ» (модель «веерного» случайного процесса) является слабовыраженной по сравнению с характеристикой «среднее значение погрешности в партии СИ» (модель «линейного» случайного процесса).

– оценку МПИ для счетчиков данного типа можно проводить только по результатам исследования дрейфа среднего значения погрешности СИ в партии, т. е. с использованием модели «линейного» случайного процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Об обеспечении единства измерений: Закон Респ. Беларусь от 5 сент. 1995 г. № 3848-XII // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=v19503848>.
2. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений: РМГ 74–2004. Взамен МИ 2187–92. М.: Стандартинформ, 2006. 24 с.
3. Рекомендации по определению интервалов между поверками средств измерений. Государственная система обеспечения единства измерений. Основные положения: МИ 3676–2023. Санкт-Петербург, 2023. URL: <https://39.csmrst.ru/upload/medialibrary/a43/ec1w93qqswnak7cm76dfkyil0fyjsq2g/%D0%A0%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8%20%D0%9C%D0%98%203676-2023.pdf>.
4. Фридман, А. Э. Основы метрологии: современный курс / А. Э. Фридман. СПб.: Профессинал, 2008. 279 с.
5. Ефремов, Л. В. Вероятностная оценка метрологической надежности средств измерений: Алгоритмы и программы / Л. В. Ефремов. СПб.: Нестор-История, 2011. 200 с.
6. Kalina, J. Modern approaches to statistical estimation of measurements in the location model and regression / J. Kalina, P. Vidnerová, L. Soukup // Handbook of Metrology and Applications. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. С. 2355–2376. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2074-7_125.
7. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. М.: Наука, 1972. 550 с.
8. Барзилович, Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем / Е. Ю. Барзилович. М.: Высш. шк., 1982. 306 с.
9. Шаров, Г. А. Статистическая метрология / Г. А. Шаров. М.: Горячая Линия – Телеком, 2022. 664 с.
10. Фокин, Ю. А. Вероятностно-статистические методы в расчетах систем электроснабжения / Ю. А. Фокин. М.: Энергоатомиздат, 1985. 215 с.
11. Стукач, О. В. Программный комплекс Statistica в решении задач управления качеством: учеб. пособие / О. В. Стукач; Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2011. 163 с.
12. Семенихин, К. В. Двусторонняя вероятностная граница для симметричной унимодальной случайной величины / К. В. Семенихин // Автоматика и телемеханика. 2019. №. 3. С. 103–122.
13. Доброго, К. В. Универсальная имитационная модель деградации аккумуляторных батарей с оптимизацией параметров по генетическому алгоритму / К. В. Доброго, И. А. Козначеев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 6. С. 481–498. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-481-498>.
14. Автоматизированный анализ срока службы воздушных линий электропередачи электро-энергетических систем / Э. М. Фархадзаде, А. З. Мурадалиев, С. А. Абдуллаева, А. А. Назаров // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 5. С. 435–445. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-435-445>.

Поступила 12.05.2025 Подписана в печать 15.07.2025 Опубликовано онлайн 30.09.2025

REFERENCES

1. On Ensuring the Uniformity of Measurements: Law of the Republic of Belarus of September 5, 1995 No. 3848-XII. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=v19503848> (in Russian).
2. RMG 74–2004. *Methods for Determining Inter-Verification and Inter-Calibration Intervals of Measuring Instruments*. Moscow, Standartinform Publ., 2006 (in Russian).

3. MI 3676–2023. Recommendations for Determining Intervals between Verifications of Measuring Instruments. State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. Basic Provisions. Saint Petersburg, 2023. Available at: <https://39.csmrst.ru/upload/medialibrary/a43/ec1w93qqsnwak7cm76dfkyil0fyjsq2g/%D0%A0%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8%20%D0%9C%D0%98%203676-2023.pdf> (in Russian).
4. Fridman A. E. (2008) *Fundamentals of Metrology: Modern Course*. Saint Petersburg, Professional Publ. 279 (in Russian).
5. Efremov L. V. (2011) *Probabilistic Assessment of Metrological Reliability of Measuring Instruments: Algorithms and Programs*. Saint Petersburg, Nestor-Istoriya Publ. 200 (in Russian).
6. Kalina J., Vidnerová P., Soukup L. (2023) Modern Approaches to Statistical Estimation of Measurements in the Location Model and Regression. *Handbook of Metrology and Applications*. Singapore, Springer Nature Singapore, 2355–2376. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2074-7_125.
7. Venttsel E. S. (1972) *Probability Theory*. Moscow, Nauka Publ. 550 (in Russian).
8. Barzilovich E. Yu. (1982) *Models of Maintenance of Complex Systems*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 306 (in Russian).
9. Sharov G. A. (2022) *Statistical Metrology*. Moscow, Goryachaya Liniya – Telekom Publ. 664 (in Russian).
10. Fokin Yu. A. (1985) *Probabilistic-Statistical Methods in Calculations of Power Supply Systems*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 215 (in Russian).
11. Stukach O. V. (2011) *Statistica Software Package in Solving Quality Management Problems*. Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnical University. 163 (in Russian).
12. Semenikhin, K. V. (2019). Two-Sided Probability Bound for a Symmetric Unimodal Random Variable. *Automation and Remote Control*, 80 (3), 474–489. <https://doi.org/10.1134/s000511791903007x>.
13. Dobrego K. V., Koznacheev I. A. (2022) Universal Simulation Model of Battery Degradation with Optimization of Parameters by Genetic Algorithm. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (6), 481–498. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-481-498> (in Russian).
14. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Abdullayeva S. A., Nazarov, A. A. (2021) Automated Analysis of Service Life of Air-Lines of the Electricity Transmission of Electric Power Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (5), 435–445. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-435-445> (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-403-416>

УДК 621.019

Повышение эффективности диагностики состояния силовых трансформаторов

А. З. Мурадалиев¹⁾, С. М. Исмаилова¹⁾

¹⁾Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-изыскательский
институт энергетики (Баку, Азербайджанская Республика)

Реферат. В последние годы понимание эффективности технической диагностики электрооборудования существенно возросло. Основными причинами этого является то, что более половины парка эксплуатируемого оборудования выработало расчетный ресурс, а темпы старения оборудования превышают темпы его обновления вследствие ограниченности средств на техническое обслуживание и из-за перехода на ремонты по техническому состоянию. Качественно и своевременно проведенное диагностирование повышает объективность оценки технического состояния высоковольтного электрооборудования. Все это позволяет планировать и своевременно проводить необходимые операции технического обслуживания и ремонта, что делает надежнее эксплуатацию электрооборудования, продлевает ресурс его работы, экономит средства, снижает риски ущербов. Одним из факторов, влияющих на эффективность диагностики состояния электрооборудования, является ощутимый дефицит квалифицированных специалистов в области технической диагностики. Разработан метод оценки момента возникновения изменения роста концентрации растворенных в масле газов, позволяющий установить наличие развивающегося дефекта трансформатора, основные газы, вероятный тип дефекта и характер его проявления. Предлагаются метод и алгоритм прогнозирования времени возникновения неисправного состояния силовых трансформаторов по данным хроматографического анализа газов, растворенных в масле трансформатора (ХАРГ). Рекомендуемый алгоритм для расчета времени возникновения дефекта, интенсивности и длительности воздействия эксплуатационных факторов на изменение концентрации растворенных газов по данным ХАРГ позволит повысить объективность сопоставления однотипных показателей растворенных в масле газов на начальной стадии изменения износа. Предлагаемая методика оценки статистической значимости рассматриваемых признаков и их разновидностей позволяет обеспечить объективность расчета этих показателей. Установлено, что основным показателем следует считать расчетный интервал времени до возникновения дефекта.

Ключевые слова: трансформатор, диагностика, техническое состояние, хроматографический анализ, дефект, время возникновения, интенсивность, длительность

Для цитирования: Мурадалиев, А. З. Повышение эффективности диагностики состояния силовых трансформаторов / А. З. Мурадалиев, С. М. Исмаилова // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 5. С. 403–416. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-403-416>

Адрес для переписки

Мурадалиев Айдын Зураб оглы
Азербайджанский научно-исследовательский
и проектно-изыскательский институт энергетики
просп. Гасанбек Зардаби, 94
AZ1012, г. Баку, Азербайджанская Республика
Тел.: +99450 680-40-93
aydin_murad@yahoo.com

Address for correspondence

Muradaliyev Aydin Zurab oglu
Azerbaijan Scientific-Research
and Design-Prospecting Institute of Energetic
94, Hasanbek Zardabi Ave.,
AZ1012, Baku, Azerbaijan Republic
Tel.: +99450 680-40-93
aydin_murad@yahoo.com

Increasing the Efficiency of Power Transformer Condition Diagnostics

A. Z. Muradaliyev¹⁾, S. M. Ismailova¹⁾

¹⁾Azerbaijan Scientific-Research and Design-Prospecting Institute of Energetic
(Baku, Azerbaijan Republic)

Abstract. In recent years, the understanding of the efficiency of technical diagnostics of electrical equipment has increased significantly. The main reasons for this are that more than half of the equipment in operation has exhausted its estimated service life; the rate of equipment aging exceeds the rate of its renewal due to limited funds for technical maintenance, as well as due to the transition to repairs based on technical condition. High quality and timely diagnostics improve the objectivity of assessing the technical condition of high-voltage electrical equipment. All this allows planning and timely execution of necessary maintenance and repair operations, which makes the operation of electrical equipment more reliable, extends its service life, saves money, and reduces the risk of damage. One of the factors influencing the efficiency of diagnostics of the condition of electrical equipment is the noticeable shortage of qualified specialists in the field of technical diagnostics. A method for assessing the moment of occurrence of a change in the growth of concentration of gases dissolved in oil has been developed, which allows to establish the presence of a developing transformer defect, the main gases, the probable type of defect and the nature of its manifestation. A method and algorithm for predicting the time of occurrence of a faulty state of power transformers based on data of chromatographic analysis of gases (CADG) dissolved in transformer oil are proposed. The recommended algorithm for calculating the time of occurrence of a defect, the intensity and duration of the impact of operational factors on the change in the concentration of dissolved gases according to the CADG data will improve the objectivity of comparing similar indicators of gases dissolved in oil at the initial stage of wear changes. The proposed methodology for assessing the statistical significance of the considered features and their varieties allows us to ensure the objectivity of calculating these indicators. It has been established that the main indicator should be considered the calculated time interval before the defect occurs.

Key words: transformer, diagnostics, technical condition, chromatographic analysis, defect, time of occurrence, intensity, duration

For citation: Muradaliyev A. Z., Ismailova S. M. (2025) Increasing the Efficiency of Power Transformer Condition Diagnostics. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (5), 403–416. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-403-416> (in Russian)

Введение

Одним из факторов, влияющих на развитие энергетической отрасли, является нарастающая доля оборудования, срок службы которого превышает нормативный [1]. Увеличение промышленного производства приводит к росту энергопотребления, а следовательно, и к увеличению количества негативных внешних воздействий (перегрузок, перенапряжений и т. д.) [2].

В совокупности с износом это способствует определенному росту числа аварий и отказов оборудования. В этих условиях повышение эффективности диагностики состояния электротехнического оборудования предполагает разработку новых подходов и методов оценки его технического состояния, развитие системы диагностики, которая предполагается в виде четкой техниче-

ской стратегии по выявлению дефектов электрооборудования и прогнозированию их развития [3, 4]. Существенный вклад в совершенствование системы анализа результатов измерения диагностических показателей внесли исследования [5], ориентированные на использование экспертных систем.

Технология оценки состояния маслонаполненного электрооборудования предполагает использование любой информации об объекте на любом этапе его жизненного цикла. При этом для оценки состояния трансформаторов используются результаты: всех видов межремонтных испытаний; периодических и внеочередных осмотров; тепловизионного контроля; проверки коэффициента трансформации; проверки группы соединений обмоток и т. д.

В то же время при оценке состояния высоковольтных вводов анализируется информация, которая вводится по результатам проведения таких видов испытаний, как: хроматографический анализ масла (ХАРГ); измерение параметров изоляции под рабочим напряжением; физико-химический анализ масла; тепловизионный контроль и т. д. [6].

Важным результатом является выдача рекомендаций по итогам анализа состояния оборудования, которые могут быть сгруппированы как:

- диагностические, которые направлены на уточнение вида дефекта и связаны с проведением новых испытаний;
- текущие, которые призваны уменьшить отрицательное воздействие возможных дефектов, т. е. обеспечить работоспособное состояние оборудования или предотвратить аварию.

Данный подход направлен на оценку состояния не только объекта управления, но и субъекта управления, т. е. на подготовку оперативного и ремонтного персонала. Основное внимание акцентируется на трех направлениях: обеспечении надлежащего уровня подготовки оперативного, ремонтного и инженерно-технического персонала; обеспечении персонала нормативно-технической документацией; организации обслуживания, контроля и оценки состояния оборудования, планирования и проведения ремонтно-технического обслуживания. Решение этих задач основывается на применении алгоритма контроля значимости признаков и их разновидностей [7].

Одной из основных задач диагностики технического состояния оборудования энергосистем является оценка времени возникновения дефекта и длительности его развития до уровня, при котором вероятность повреждения достаточно велика. Отсутствие этой информации приводит к тому, что периодичность и объем испытаний оборудования регламентируются как детерминированные величины, т. е. величины, не зависящие от технического состояния оборудования.

В определенной мере решение вопроса о сроках проведения испытания и ремонта достигается оценкой остаточного срока службы до отказа работоспособности (ΔT_c^*). Оценка этой величины в соответствии с [8] проводится по формуле

$$\Delta T_c(t_k) = \min \Delta T_{c,1}(t_k); \Delta T_{c,2}(t_k); \dots; \Delta T_{c,m}(t_k), \quad (1)$$

$$\Delta T_{c,j}^*(t_k) = \frac{1 - I_{z_j}(t_k)}{V[I_{z_j}(t_k)]}, \quad (2)$$

где t_k – дата контрольного испытания; m – число показателей, характеризующих техническое состояние оборудования; $I_{z_j}(t_k)$ – величина износа j -го материала в момент t_k , вычисляется по выражению

$$I_{z_j}(t_k) = \frac{P_j(t_k) - P_{j,0}}{P_{j,\text{доп}} - P_{j,0}}, \quad j = 1, m; \quad (3)$$

$P_j(t_k)$ – условное обозначение количественной оценки j -го показателя в момент времени t_k ; $P_{j,0}$ и $P_{j,\text{доп}}$ – исходные и предельно допустимые значения j -го показателя; $V[I_{z_j}(t_k)]$ – скорость изменения значения j -го показателя в момент t_k , рассчитывается по формуле

$$V[I_{z_j}(t_k)] = \frac{I_{z_j}(t_k) - I_{z_j}(t_{k-1})}{(I_{j,\text{доп}} - I_{j,\text{исх}})(t_k - t_{k-1})}, \quad (4)$$

где t_{k-1} – момент предшествующего испытания.

Вопрос о времени возникновения дефекта остается открытым во многом потому, что нет четкой количественной интерпретации понятия «дефект». Несмотря на ряд формулировок, в них недостаточно отображалась физическая суть процесса. Кратко рассмотрим физическую суть процесса развития дефекта.

Известно, что в процессе эксплуатации оборудования происходит монотонное ухудшение электрических, электромагнитных, тепловых, механических и прочих свойств элементов конструкции. Закономерности изменения этого процесса достаточно сложны, включают непрерывную и дискретную составляющие, определяются многими эксплуатационными факторами.

На определенном этапе износа, когда ресурс бездефектности (или «порог чувствительности») преодолен, начинают проявляться «слабые звенья» материалов. Эти «слабые звенья» называют, как правило, местными дефектами. Проявляются они в том, что скорость износа материала существенно возрастает [9]. Число дефектов и их разновидности зависят от срока службы оборудования (T_c) и, без сомнения, увеличиваются по мере роста T_c . Подтверждением тому является опыт осмотра оборудования, отключенного для проведения капитального ремонта.

Таким образом, под временем возникновения дефекта будем понимать момент, начиная с которого скорость износа оборудования возрастает. Практическую реализацию этого подхода рассмотрим на примере изменения технического состояния силовых трансформаторов. По мере

увеличения относительного числа силовых трансформаторов, срок службы которых превышает расчетный, возрастает и актуальность проблемы уточнения оценки их технического состояния, уточнения парка неисправных трансформаторов, оценки объема плановых ремонтов, целесообразности замены.

В настоящее время к числу наиболее эффективных методов диагностики изменения износа в силовых трансформаторах, без вывода их из работы, относится хроматографический метод анализа растворенных в масле газов [6]. В этой связи совершенствование методов оценки и прогнозирования состояния оборудования по результатам анализа и систематизация накопленных данных ХАРГ имеют важное практическое значение. Характерной особенностью используемой на практике методологии обработки данных ХАРГ является многокритериальный характер принятия решения о наличии, виде и характере развивающегося повреждения трансформаторов.

В основе критериев находятся результаты измерения концентрации отдельных газов $\{A_i\}_n$, где n – число анализируемых газов, расчета концентрации суммы горючих газов (A_Σ) и отношения концентраций отдельных газов $\{A_i/A_j\}_m$, где m – число расчетных отношений.

Наряду с сопоставлением с граничными значениями концентраций газов, соответственно с $\{A_{i, \text{доп}}\}_n$, $A_{\Sigma, \text{доп}}$ или интервалами возможных значений (для отношения концентрации отдельных газов), широко применяются критерии, основанные на сопоставлении скорости изменения $[v(A_i)]_n$, $v(A_\Sigma)$ с допустимыми значениями. Превышение хотя бы одного из измеренных значений $\{A_i\}_n$ соответствующих допустимых величин $\{A_{i, \text{доп}}\}_n$, или скорости их изменения величины 10 % об, свидетельствует о возможности возникновения дефекта и необходимости выявления причин указанных превышений.

Выявляемые по данным ХАРГ дефекты в основном относятся к группе дефектов, наличие которых практически сказывается на показателях надежности и эффективности работы трансформаторов в межремонтном периоде. Особенностью диагностики технического состояния трансформаторов по данным ХАРГ является также и то, что существенное увеличение концентрации анализируемых газов часто возникает на бездефектных трансформаторах. Эти изменения обусловлены, как правило, воздействием ряда эксплуатационных факторов [10]. Отсутствие сведений об этих факторах может привести к ложным заключениям необходимости проведения ряда повторных ХАРГ.

Следовательно, повышение объективности выводов и рекомендаций по данным ХАРГ неразрывно связано с необходимостью подробной реги-

страции всех работ и событий, приводящих к изменению состава и объема масла трансформаторов. Воздействие ряда эксплуатационных факторов достаточно полно выявляется по данным физико-химического анализа масла (ФХАМ). Поэтому целесообразно изменение данных ХАРГ сопоставлять с изменением данных ФХАМ.

Процесс изменения концентрации растворенных в масле газов в реальных условиях существенно отличается от «лабораторных» моделей, когда для фиксированного типа дефекта (электрический разряд или нагрев) и характера их проявления исследуется соотношение выделяемых в масле газов. В реальных условиях газы выделяются также в результате старения изоляции трансформаторов, воздействия перенапряжений, сквозных токов короткого замыкания, изменения нагрузки и многих других эксплуатационных факторов. Интенсивность этого процесса существенно возрастает при возникновении одного из многих возможных дефектов.

Важным условием повышения достоверности анализа данных ХАРГ является совершенствование методологии расчета показателей, характеризующих техническое состояние трансформатора.

Рассмотрим некоторые особенности обработки данных ХАРГ [11, 12].

Опыт эксплуатации показывает, что заслуживающее внимания изменение концентрации растворенных в масле газов наиболее часто проявляется в превышении скорости изменения относительной концентрации газа допустимой величины $V[\delta A(t)]_{\text{доп}}$. Такой трансформатор берется на контроль, и через 1–2 недели проводится контрольный ХАРГ.

Известные рекомендации по оценке $V[\delta A(t)]_{\text{доп}}$ основываются на приведении абсолютной скорости нарастания i -го газа в момент t_{j+1} к предшествовавшему значению (в момент t_j) концентрации этого газа по формуле

$$V_{\text{отн}}(t_{j+1}) = \frac{A(t_{j+1}) - A(t_j)}{A(t_j) \cdot \Delta T_{j+1}} \cdot 100 \quad (\% \text{ в мес.}), \quad (5)$$

что ограничивает возможность анализа динамики изменения $V_{\text{отн}}(t)$.

Чтобы преодолеть эту трудность, рекомендуется расчеты скорости изменения относительной концентрации i -го газа выполнять по формуле

$$V[\delta A(t_{j+1})] = \frac{\delta A_i(t_{j+1}) - \delta A_i(t_j)}{\Delta T_{j+1}} = \frac{A_i(t_{j+1}) - A_i(t_j)}{A_{i,\text{гр}} \Delta T_{j+1}}, \quad (6)$$

где $\Delta T_{j+1} = (t_{j+1} - t_j)$.

При этом предполагается, что верхнее граничное (допустимое) значение $V[\delta A_i(t)]_{\text{доп}} \leq 10 \%$, что исключает различие требований к $V[\delta A_i(t)]$ в момент t_j и t_{j+k} и условия $V_{\text{отн}}(t) < 10 \%$ вследствие эффекта монотонного увеличения скорости.

Если в результате обработки данных контрольного ХАРГ установлено, что скорость нарастания газа еще более увеличилась, то при сохранении предположения о линейном характере изменения относительной концентрации газа в масле силовых трансформаторов оценка момента изменения скорости может быть выполнена решением следующего уравнения:

$$\delta A_i(t_k) = V[\delta A_i(t_{j+1})](t_x - t_j) = \delta A_i(t_{j+3}) - V[\delta A_i(t_{j+3})](t_{j+3} - t_x), \quad (7)$$

где $i = 1, 7$; $t_x - t_j = \Delta T_x$; $t_{j+1} - t_j = \Delta T_1$; $t_{j+2} - t_{j+1} = \Delta T_2$; $t_{j+3} - t_{j+2} = \Delta T_3$;
 $t_{j+3} - t_x = \sum_{v=1}^3 \Delta T_v - \Delta T_x$; $V[\delta A_i(t_{j+1})]$ и $V[\delta A_i(t_{j+3})]$ – скорости изменения относительной концентрации газа в моменты t_{j+1} и t_{j+3} .

В рассмотрение вводим показатель относительной концентрации i -го газа в момент $t_j - \delta A_i(t_j)$. Количественно он определяется по формуле

$$\delta A_i(t_j) = \frac{A_i(t_j) - A_{i,исх}}{A_{i,доп} - A_{i,исх}}, \quad (8)$$

где $A_{i,исх}$ и $A_{i,доп}$ – соответственно исходное и допустимое (граничное) значения концентрации i -го газа.

Наибольшее значение относительной концентрации газов определим по формуле

$$A \delta A_{\max}(t) = \max[\delta A_1(t_1); \delta A_2(t_2); \dots; \delta A_n(t_n)]. \quad (9)$$

Интенсивность процесса изменения износа узлов силовых трансформаторов характеризуется скоростью изменения нарастания концентрации газов в масле. Чтобы сопоставить скорости изменения концентрации газов, оценку скорости необходимо проводить по выражению

$$v[\delta A_i(t_2)] = \frac{\delta A_i(t_2) - \delta A_i(t_1)}{(t_2 - t_1)} = \frac{A_i(t_2) - A_i(t_1)}{(A_{i,доп} - A_{i,исх})(t_2 - t_1)}. \quad (10)$$

При этом наибольшая скорость изменения концентрации газов будет равна

$$v[\delta A(t)]_{\max} = \max\{v[\delta A_1(t)]; v[\delta A_2(t)], \dots, v[\delta A_n(t)]\}. \quad (11)$$

Показатели $\delta A_{\max}(t)$ и $v[\delta A(t)]_{\max}$, безусловно, важны, однако в отдельности недостаточно информативны. Поэтому выявление основных газов целесообразно проводить путем сопоставления остаточного времени $\{\Delta T_i(t_k)\}_n$ в момент времени t_k , по истечении которого величина $\delta A(t)$ будет равна единице, по формуле

$$\Delta T_i(t_k) = [1 - \delta A_i(t_k)] / v[\delta A_i(t_k)], \quad i = 1, n. \quad (12)$$

Величина $\Delta T_i(t_k)$, по сути, есть оценка времени до последующего контроля концентрации газов в масле силовых трансформаторов.

Следовательно, последующий ХАРГ должен быть проведен за время, не превышающее

$$\Delta T_{\text{доп}}(t_k) = \min\{\Delta T_1(t_k), \Delta T_2(t_k), \dots, \Delta T_n(t_k)\}. \quad (13)$$

Оценка величины $\Delta T_{\text{доп}}(t_k)$ проводится при $\delta A_{\text{max}}(t) < 1$. Если же $\delta A_{\text{max}}(t) > 1$, то следует руководствоваться соответствующими рекомендациями по организации контроля изменения концентрации газов трансформаторного масла, представленными в [6].

На рис. 1 приведена графическая иллюстрация сущности величины t_x (момент изменения скорости относительной концентрации газа) и рекомендуемая последовательность ее оценки.

Решив уравнение (7) относительно t_x , получим

$$t_x = t_j + \Delta T_x = t_j + \frac{V[\delta A_i(t_{j+3})] \sum_{v=1}^3 \Delta T_v - \delta A_i(t_{j+3})}{V[\delta A_i(t_{j+3})] - V[\delta A_i(t_{j+1})]}. \quad (14)$$

Как следует из рис. 1, реальный процесс изменения относительной величины концентрации i -го газа соответствует маршруту $acde$, а регистрируемый по данным ХАРГ – маршруту $abde$.

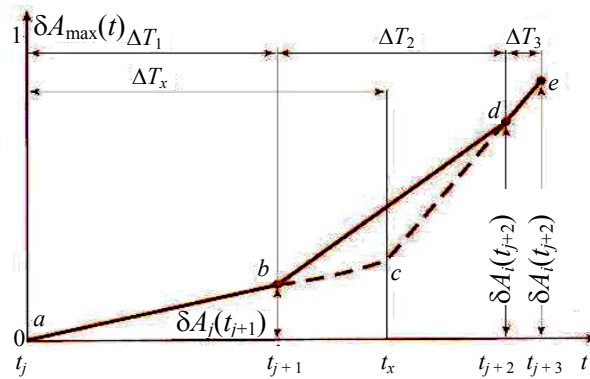


Рис. 1. Графическая иллюстрация алгоритма оценки величины t_x

Fig. 1. Graphic illustration of the algorithm for estimating the value of t_x

Пример 1. В табл. 1 приведены данные о значениях концентрации метана (CH_4), по данным ХАРГ, соответственно через $\Delta T_1 = 6$ мес., $\Delta T_2 = 5$ мес. и $\Delta T_3 = 0,25$ мес. после капитального ремонта силового трансформатора.

В табл. 2 даны результаты расчетов показателей относительной концентрации $\delta A(t_j)$ и скорости изменения концентрации $V[\delta A(t_j)]$ соответственно по формулам (8) и (10).

Целью контрольного ХАРГ был анализ влияния увеличения нагрузки трансформатора на концентрацию растворенных в трансформаторном масле газов.

Таблица 1

Сведения о концентрации метана в пробах трансформаторного масла (% об)

Information on methane concentration in transformer oil samples (% vol)

После капитального ремонта, % об	Контрольные измерения		
	$\Delta T_1 = 6$ мес., % об	$\Delta T_2 = 5$ мес., % об	$\Delta T_3 = 0,25$ мес., % об
0,0015	0,0025	0,0075	0,0085

Таблица 2

Результаты расчетов показателей изменения концентрации метана

Results of calculations of indicators pertaining to changes in methane concentration

$\Delta T_1 = 6$ мес.		$\Delta T_2 = 5$ мес.		$\Delta T_3 = 0,25$ мес.	
$\delta C(t_1)$, о. е.	$V[\delta C(t_1)]$, % мес.	$\delta C(t_2)$, о. е.	$V[\delta C(t_2)]$, % мес.	$\delta C(t_3)$, о. е.	$V[\delta C(t_3)]$, % мес.
0,117	1,950	0,706	11,800	0,823	46,800

Как следует из табл. 2, при контрольном измерении концентрации метана в пробе трансформаторного масла установлено существенное увеличение $V[\delta A(t_j)]$ по сравнению со скоростью изменения в первые 6 месяцев эксплуатации ($46,8/1,95 = 24$ раза). Анализ эксплуатационных факторов показал, что в этот момент времени отмечено подключение нового потребителя к подстанции и увеличение нагрузки силового трансформатора.

В соответствии с формулой (14) и данными табл. 2 определим величину ΔT_x

$$\Delta T_x = \frac{(46,8 \cdot 11,25)10^{-2} - 0,823}{(46,8 - 1,95)10^{-2}} = 9,9 \text{ мес.}$$

Как известно, изменение $\delta A(t)$ происходит не только из-за развивающихся дефектов силовых трансформаторов, но и вследствие воздействия ряда эксплуатационных факторов. Одни факторы приводят к увеличению концентраций растворенных газов в масле (к ним относятся: увеличение нагрузки, доливка масла, бывшего в эксплуатации и содержащего растворенные газы, и т. д.), другие же – к уменьшению концентрации растворенных газов (например, замена силикогеля, дегазация масла и др.).

На практике значительный интерес представляют вопросы о величине и длительности изменения $\delta A(t)$. Графическая иллюстрация процесса изменения $\delta A(t)$ приведена на рис. 2а и 2б.

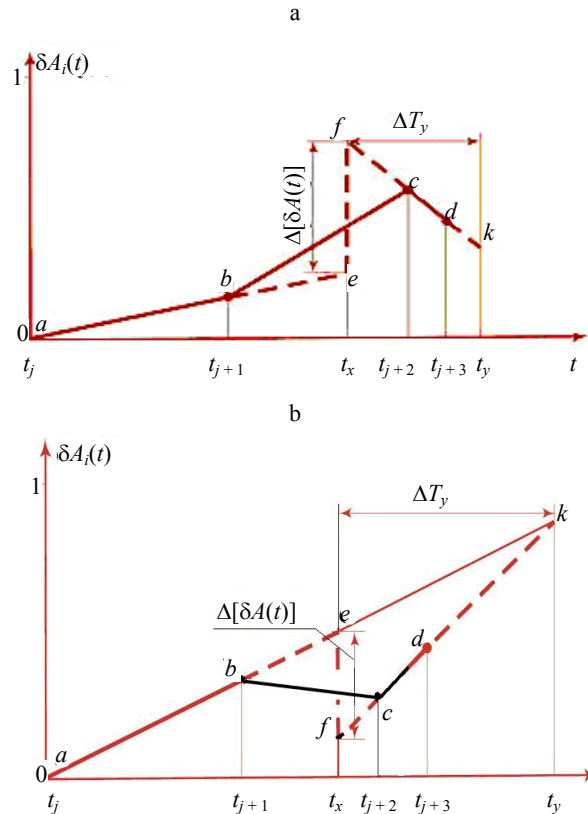


Рис. 2. Графическая иллюстрация изменения $\delta A(t)$ при воздействии эксплуатационных факторов, вызывающих: а – увеличение $\delta A(t)$; б – уменьшение $\delta A(t)$

Fig. 2. Graphic illustration of changes $\delta A(t)$ under the influence of operational factors causing: a – increase $\delta A(t)$; b – decrease $\delta A(t)$

Из этих графиков наглядно видно, что действительная закономерность изменения $\delta A(t)$ существенно отличается от кусочно-линейной кривой, построенной по данным ХАРГ. Так, на рис. 2а показано совмещение двух процессов изменения $\delta A(t)$. Первый из них связан с естественным старением изоляции, изменением ее диэлектрических свойств, теплопроводности, механической прочности. Второй процесс обусловлен эксплуатационным фактором, вызывающим в момент t_x увеличение $\delta A(t)$ масла трансформаторов. Действительная закономерность изменения $\delta A(t)$ характеризуется маршрутом $abefcd$, а формируемая по данным ХАРГ – маршрутом $abcd$.

Аналогичное заключение может быть сделано и по данным рис. 2б. На этом рисунке на процесс монотонного (линейного) изменения $\delta A(t)$ накладывается процесс изменения $\delta A(t)$ вследствие воздействия, вызывающего резкое уменьшение $\delta A(t)$.

Чтобы рассчитать величину $\delta A(t)$ в результате некоторого воздействия, воспользуемся уравнениями прямых, проходящих через точки a и b , c и d , имеющими соответственно вид:

$$\delta A(t) = V[\delta A(t_{j+1})]t; \quad (15)$$

$$\delta A(t) = V[\delta A(t_{j+3})](t - t_{j+2}) + \delta A(t_{j+2}). \quad (16)$$

Если обозначим величину относительной концентрации растворенных в масле газов до воздействия в момент t_x некоторого эксплуатационного фактора через $\delta A(t_x)$, то в соответствии с уравнением (14)

$$\delta A(t_x) = V[\delta A(t_{j+1})] \cdot t_x$$

и графически иллюстрируется отрезком прямой, соединяющей точки t_x и e .

После воздействия этого фактора относительная концентрация газов, растворенных в трансформаторном масле, практически мгновенно изменяется, и в соответствии с уравнением (15) становится равной

$$\delta A(t_x) = V[\delta A(t_{j+3})](t_x - t_{j+2}) + \delta A(t_{j+2}), \quad (17)$$

и графически отображается отрезком прямой, соединяющей точки t_x и f .

В соответствии с рис. 2 величина воздействия эксплуатационного фактора отображается отрезком прямой fe , который для рис. 2а вычисляется как разность отрезков $t_x f$ и $t_x e$ по формуле

$$\Delta_1[\delta A(t_x)] = V[\delta A(t_{j+3})] \cdot (t_x - t_{j+2}) + \delta A(t_{j+2}) - V[\delta A(t_{j+1})] t_x, \quad (18)$$

а для рис. 2б вычисляется как разность отрезков $t_x e$ и $t_x f$ по формуле

$$\Delta_2[\delta A(t_x)] = V[\delta A(t_{j+1})] \cdot t_x - V[\delta A(t_{j+3})](t_x - t_{j+2}) - \delta A(t_{j+2}). \quad (19)$$

Таким образом:

$$\Delta[\delta A(t_x)] = \Delta_1[\delta A(t_x)] = -\Delta_2[\delta A(t_x)]. \quad (20)$$

Завершение изменения величины $\delta A(t)$, обусловленной воздействием эксплуатационного фактора, происходит в момент времени t_y , который, исходя из уравнений (12) и (13), вычисляется по формуле

$$t_y = \frac{\delta A(t_{j+2}) - V[\delta A(t_{j+3})] t_{j+2}}{V[\delta A(t_{j+1})] - V[\delta A(t_{j+3})]}, \quad (21)$$

а длительность изменения относительной концентрации газов в трансформаторном масле бездефектного трансформатора определяется по выражению

$$\Delta T_y = t_y - t_x. \quad (22)$$

Анализ графиков рис. 2 свидетельствует о том, что возникновение внезапного изменения (увеличения или уменьшения) $\delta A(t)$ вследствие воздействия эксплуатационных факторов приводит к снижению скорости $V[\delta A(t)]$ на интервале $[t_{j+2}; t_{j+3}]$ (при повышении $\delta A(t)$) или увеличению скорости на интервале $[t_{j+1}; t_{j+2}]$ (при снижении $\delta A(t)$), и может рассматриваться как диагностический признак причин изменения $\delta A(t)$. Заметим, что при наличии дефектов силового трансформатора скорость изменения $\delta A(t)$ удовлетворяет условию

$$V[\delta A(t_j)] \leq V[\delta A(t_{j+1})] \leq V[\delta A(t_{j+2})], \text{ где } t_j < t_{j+1} < t_{j+2}. \quad (23)$$

Оценка величины $\Delta T_{\text{доп}}(t_k)$ проводится при $\delta A_{\text{max}}(t) < 1$. Если же $\delta A_{\text{max}}(t) > 1$, то следует руководствоваться соответствующими рекомендациями по организации контроля изменения концентрации газов трансформаторного масла, представленными в [6].

Оценка технического состояния трансформаторов по суммарному (Σ) содержанию горючих газов в масле также проводится на основе показателей $\delta A_{\Sigma}(t)$; $v[\delta A(t)]_{\Sigma}$ и $\Delta T_{\Sigma}(t)$ с той разницей, что вместо конкретного i -го газа рассматривается сумма горючих газов со своими значениями $A_{\Sigma, \text{исх}}$, $A_{\Sigma, \text{доп}}$ и $A_{\Sigma}(t)$.

Опыт эксплуатации показывает, что характер износа силовых трансформаторов часто может быть установлен из соотношения концентрации газов H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_2 и C_2H_6 , а именно из соотношения $\frac{\text{C}_2\text{H}_2}{\text{C}_2\text{H}_4}$,

$$\frac{\text{CH}_4}{\text{H}_2} \text{ и } \frac{\text{C}_2\text{H}_4}{\text{C}_2\text{H}_6}.$$

С учетом того, что соотношение абсолютных значений отмеченных выше газов недостаточно объективно, повышение информативности физически объяснимых соотношений может быть достигнуто переходом к соотношениям соответствующих оценок $\delta A_i(t)$.

ВЫВОДЫ

1. Техническое состояние силовых трансформаторов в значительной степени зависит от воздействующих эксплуатационных факторов. Рекомендуемые формулы для расчета времени возникновения дефекта (ΔT_x), интенсивности $\Delta[\delta(t)]$ и длительности (ΔT_y) воздействия эксплуатационных факторов на изменение концентрации растворенных газов по данным

ХАРГ позволяют повысить объективность анализа технического состояния силовых трансформаторов.

2. Предложен метод расчета показателей, характеризующих концентрацию растворенных в трансформаторном масле газов. Физическая обоснованность формул обуславливает объективность расчета.

3. Основные газы наиболее объективно определяются по показателю, характеризующему интервал времени до проведения очередного ХАРГ. Газ следует считать основным, если этот интервал времени у него наименьший.

4. Оценка граничных значений концентраций растворенных в трансформаторном масле газов при «механической» классификации данных ХАРГ по множеству эксплуатационных факторов и их разновидностей представляет определенную сложность. Предлагаемая методика оценки статистической значимости рассматриваемых признаков и их разновидностей позволяет обеспечить объективность расчета этих показателей.

5. Существует зависимость достоверности наличия дефектов силовых трансформаторов, устанавливаемого по данным ХАРГ, от эксплуатационных факторов. Это определяет необходимость использования автоматизированных систем обработки данных ХАРГ, как подсистемы интеллектуального анализа технического состояния трансформаторов, систематизирующего и обобщающего информацию об условиях эксплуатации, отказах, испытаниях и плановых ремонтах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Силовые трансформаторы: справ. кн. / под ред. С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина. М.: Энергоатомиздат, 2004. 616 с.
2. Попов, Г. В. Определение индекса технического состояния силовых трансформаторов в процессе их эксплуатации / Г. В. Попов, Е. Б. Игнатьев // Вестник ИГЭУ. 2014. Вып. 4. С. 25–33.
3. Автоматизированный анализ срока службы воздушных линий электропередачи электроэнергетических систем / Э. М. Фархадзаде [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 5. С. 435–445. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-435-445>.
4. Внутренний бенчмаркинг тепловых электростанций электроэнергетических систем / Э. М. Фархадзаде [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 6. С. 539–551. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-539-551>.
5. Граничные значения концентрации газов в масле трансформаторов тока с конденсаторной изоляцией / О. Н. Гречко, И. В. Давиденко, Н. И. Калачева [и др.] // Электротехника. 2007. № 1. С. 34–39.
6. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов. РД 153-34.0-46.302-00. М., 2001. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/4eb/4294845319.pdf>.
7. Фархадзаде, Э. М. Повышение точности оценки показателей индивидуальной надежности энергоблоков / Э. М. Фархадзаде, А. З. Мурадалиев, Ю. З. Фарзалиев // Электронное моделирование. 2007. Т. 29, № 5. С. 75–84.
8. Фархадзаде, Э. М. Методы оценки долговечности невосстанавливаемых элементов / Э. М. Фархадзаде, А. З. Мурадалиев, А. Д. Никджу // Energetikanın problemləri = Проблемы энергетики. 2001. № 1. С. 21–30.
9. Герцбах, И. Б. Модели отказов / И. Б. Герцбах, Х. Б. Кордонский. М.: Сов. радио, 1966. 166 с.

10. Львов, М. Ю. Анализ повреждаемости силовых трансформаторов / М. Ю. Львов // Электричество. 2010. № 2. С. 27–31.
11. Давиденко, И. В. Оценка технического состояния силовых трансформаторов по результатам традиционных испытаний и измерений: учеб.-метод. пособие / И. В. Давиденко. Екатеринбург: УрФУ, 2015. 96 с.
12. Давиденко, И. В. Разработка системы многоаспектной оценки технического состояния и обслуживания высоковольтного маслонаполненного электрооборудования: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / И. В. Давиденко; Уральский государственный технический университет. Екатеринбург, 2009.

Поступила 20.10.2024. Подписана в печать 15.05.2025. Опубликовано онлайн 30.09.2025

REFERENCES

1. Lizunov S. D., Lokhanin A. K. (eds.) (2004) *Power Transformers*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 616 (in Russian).
2. Popov G. V., Ignatyev E. B. (2014) Determination of the Index of Technical Condition of Power Transformers During Their Operation. *Vestnik IGEU = Vestnik of Ivanovskii Gosudarstvennyi Energeticheskii Universitet*, (4), 25–33 (in Russian).
3. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Abdullayeva S. A., Nazarov A. A. (2021) Automated Analysis of Service Life of Air-Lines of the Electricity Transmission of Electric Power Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (5), 435–445. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-435-445> (in Russian).
4. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Farzaliyev Y. Z., Ashurova U. K. (2020) Internal Benchmarking of Thermal Power Plants of Electric Power Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (6), 539–551. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-539-551> (in Russian).
5. Grechko O. N., Davidenko I. V., Kalacheva N. I., Kurbatova A. F., Smekalov V. V. (2007) Limit Values of the Gas Concentration in the Oil of Current Transformers with Capacitor Insulation. *Russian Electrical Engineering*, 78 (1), 32–36. <https://doi.org/10.3103/s1068371207010063>.
6. RD [Ruling Document] 153-34.0-46.302-00. *Methodological Guidelines for Diagnostics of Developing Defects in Transformer Equipment Based on the Results of Chromatographic Analysis of Gases Dissolved in Oil*. Moscow, 2001. Available at: URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/4eb/4294845319.pdf> (in Russian).
7. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Farzaliyev Yu. Z. (2007) Improving the Accuracy of Assessing the Individual Reliability Indicators of Power Units. *Elektronnoe Modelirovaniye = Electronic Modeling*, 29 (5), 75–84 (in Russian).
8. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Nikdzhu A. D. (2001) Methods for Assessing the Durability of Non-Renewable Elements. *Energetikanın Problemlari = Problems of Power Engineering*, (1), 21–30 (in Russian).
9. Gertsbach I. B., Kordonsky Kh. B. (1966) *Models of Failure*. Moscow, Sovetskoye Radio Publ. 166 (in Russian).
10. Lvov M. Yu. (2010) Analysis of Damage of Power Transformers. *Elektrichestvo*, (2), 27–31 (in Russian).
11. Davidenko I. V. (2015) *Assessment of the Technical Condition of Power Transformers Based on the Results of Traditional Tests and Measurements*. Yekaterinburg, Ural Federal University. 96 (in Russian).
12. Davidenko I. V. (2009) *Development of a System for Multi-Aspect Assessment of the Technical Condition and Maintenance of High-Voltage Oil-Filled Electrical Equipment* [Dissertation]. Ekaterinburg, Ural State Technical University (in Russian).

Received: 20 October 2024. Accepted: 15 May 2025. Published online: 30 September 2025

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-417-427>

УДК 621.315.2

Выбор схемы заземления экранов силовых кабельных линий

Асп. М. Э. Высоцкий¹⁾

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

Реферат. Выбор схемы заземления экранов силовых кабельных линий представляет собой комплексную инженерно-экономическую задачу, влияющую на эффективность, безопасность и экономичность эксплуатации электрических сетей. Существующие подходы часто основываются на отдельных технических или экономических критериях без их комплексного учета. Цель данной работы заключается в разработке методики выбора оптимальной схемы заземления экранов по критерию минимума приведенных затрат с учетом технических ограничений по наведенному напряжению и пропускной способности линии. В работе рассмотрены три основные схемы заземления (одно- и двустороннее, транспозиция), для которых рассчитывались капитальные затраты, ежегодные эксплуатационные издержки, наведенные токи и напряжение на экранах и длительно допустимые токи нагрузки кабелей. Определена предельная длина кабельной линии с односторонним заземлением по условию наведенного напряжения. Обозначены области применимости различных схем: одностороннее заземление применимо для линий малой длины (до 0,5–1,5 км в зависимости от площади поперечного сечения жил); двустороннее заземление оптимально для линий с небольшой токовой нагрузкой; транспозиция экранов рекомендуется для линий большой длины с относительно высокой токовой нагрузкой. Установлено, что переход от двустороннего заземления к одностороннему или транспозиции для кабелей напряжением 110 кВ увеличивает пропускную способность кабельной линии на 1–26 % в зависимости от площади поперечного сечения жилы и экрана. Актуальным представляется разработка программного обеспечения для автоматизации процесса выбора оптимальной схемы заземления экранов. Практическое применение разработанной методики позволяет оптимизировать технические решения при проектировании кабельных линий, сокращая капитальные и эксплуатационные затраты электрических сетей.

Ключевые слова: приведенные затраты, наведенное напряжение, длительно допустимый ток, одностороннее заземление, двустороннее заземление, транспозиция экранов

Для цитирования: Высоцкий, М. Э. Выбор схемы заземления экранов силовых кабельных линий / М. Э. Высоцкий // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 5. С. 417–427. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-417-427>

Selecting a Grounding Scheme for Screens of Power Cable Lines

M. E. Vysotski¹⁾

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

Abstract. The choice of a grounding scheme for the screens of power cable lines is a complex engineering and economic task that affects the efficiency, safety and cost-effectiveness

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

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

of the operation of electrical networks. Existing approaches are often based on individual technical or economic criteria without taking them into account comprehensively. The purpose of this work is to develop a method for selecting the optimal grounding scheme for screens based on the criterion of minimum reduced costs, taking into account technical limitations on induced voltage and line capacity. The paper examines three basic grounding schemes (one-sided, two-sided, transposition), for which capital costs, annual operating costs, induced currents and voltage on the shields, and long-term permissible cable load currents were calculated. The maximum length of a cable line with one-sided grounding is determined based on the induced voltage condition. The areas of applicability of various schemes are indicated: one-sided grounding is applicable for short lines (up to 0.5–1.5 km depending on the cross-sectional area of the conductors); two-sided grounding is optimal for lines with a small current load; transposition of screens is recommended for long lines with a relatively high current load. It has been established that the transition from double-sided grounding to single-sided grounding or transposition for 110 kV cables increases the capacity of the cable line by 1–26 % depending on the cross-sectional area of the core and screen. The development of software to automate the process of selecting the optimal grounding scheme for screens seems relevant. The practical application of the developed methodology allows optimizing technical solutions in the design of cable lines, reducing capital and operating costs of electrical networks.

Keywords: reduced costs, induced voltage, continuous current, one-sided grounding, two-sided grounding, screen transposition

For citation: Vysotski M. E. (2025) Selecting a Grounding Scheme for Screens of Power Cable Lines // *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (5), 417–427. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-417-427> (in Russian)

Введение

Выбор схемы заземления экранов силовых кабельных линий представляет собой комплексную инженерно-экономическую задачу, решение которой оказывает существенное влияние на эффективность, безопасность и экономичность эксплуатации электрических сетей. При проектировании кабельных линий необходимо учитывать ряд критериев, связанных с заземлением экранов: обеспечение электробезопасности, контроль наведенного напряжения, предотвращение выноса потенциала заземляющего устройства, минимизацию потерь энергии в экранах, обеспечение термической стойкости экранов и максимальной пропускной способности линий. Эти факторы напрямую влияют как на технические характеристики кабельной линии, так и на экономические показатели.

Анализ существующих исследований в данной области показывает отсутствие комплексного подхода к выбору схемы заземления экранов.

В [1] выделяют три основных критерия выбора схемы заземления экрана: уровень наведенного напряжения, потери энергии и простоту технического решения. Однако такой подход не учитывает экономические аспекты выбора, что снижает его практическую ценность.

В [2] представляют широкий спектр способов заземления экранов силовых кабелей, включая одностороннее заземление (со стороны центра питания либо со стороны нагрузки), заземление с одной стороны и объединение с другой, двустороннее заземление, двустороннее заземление через резисторы, а также различные варианты с разделением и объединением экранов в средней точке. Данная классификация дает хорошую основу для систематизации схем заземления, но не предлагает методики выбора оптимального варианта.

Международные исследования также не предлагают единого подхода к выбору схемы заземления. Группа CIGRE [3] и стандарт IEEE [4] фокусируются на технических аспектах заземления экранов, не уделяя внимания экономическим критериям выбора.

В работе [5] предлагается выбор оптимальной схемы на основе сравнения стоимости потерянной электроэнергии при двустороннем заземлении экранов и стоимости сооружения транспозиции. Согласно данному подходу, транспозиция должна быть не более чем в пять раз дороже ежегодных издержек на потери электроэнергии при двустороннем заземлении. Однако такой метод является приближенным и не учитывает, что сечение жилы также должно выбираться, исходя из экономической целесообразности.

В [6, 7] предлагают критерий выбора, основанный на сравнении суммарных дополнительных затрат на разомкнутую систему заземления с суммарными затратами на потери энергии за срок службы для замкнутой системы. Здесь также не учитывается, что сечение жилы должно выбираться по условию экономичности.

В данной работе рассматриваются три основные схемы заземления экранов, представленные на рис. 1: двустороннее заземление, одностороннее заземление и транспозиция экранов. Каждая из этих схем имеет свои преимущества и недостатки, которые следует учитывать при выборе оптимального решения.

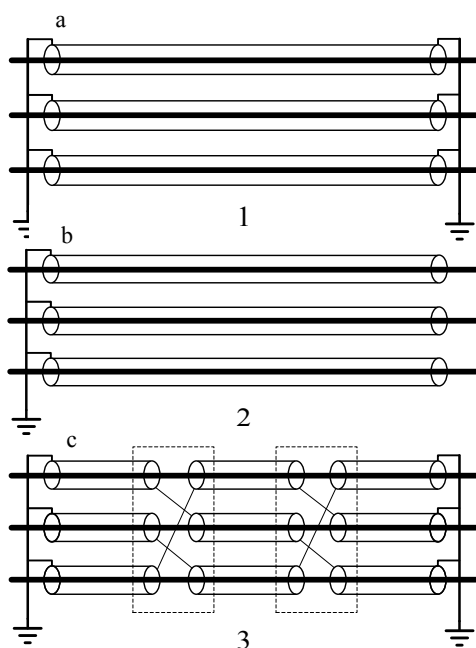


Рис. 1. Схемы заземления экранов: а – двустороннее; б – одностороннее; в – транспозиция

Fig. 1. Screen grounding schemes: a – two-sided; b – one-sided; c – transposition

Таким образом, анализ литературных источников показывает, что существующие подходы к выбору схемы заземления экранов силовых ка-

бельных линий часто основываются на отдельных технических или экономических критериях без их комплексного учета. Отсутствует единая методология, позволяющая оптимизировать конфигурацию кабельной линии по критерию минимума приведенных затрат с учетом всех технических ограничений. Данная работа направлена на устранение этого пробела.

Целью работы является разработка методики выбора оптимальной схемы заземления экранов силовых кабельных линий по критерию минимума приведенных затрат с учетом технических ограничений по наведенному напряжению и пропускной способности линии.

Наведенные токи в экранах

При двустороннем заземлении экранов в них возникают циркулирующие токи, которые приводят к дополнительным потерям энергии и снижению пропускной способности кабельной линии. Эти токи индуцируются в экранах под воздействием переменного магнитного поля, создаваемого током в жиле кабеля.

Характер и величина циркулирующих токов зависят от способа прокладки кабелей. При прокладке одножильных кабелей в плоскости с двусторонним заземлением экранов возникают токи, превышающие токи при прокладке треугольником [8]. Возникающие токи при двустороннем заземлении уменьшают длительно допустимую токовую нагрузку кабеля, поскольку дополнительно разогревают кабель. В данной работе рассматривается только прокладка треугольником, поскольку она имеет меньшие приведенные затраты [9].

Потери в экране трех одножильных кабелей, расположенных треугольником, экраны которых заземлены с двух сторон [10], составят

$$\lambda_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2},$$

где R_s – сопротивление экрана Ом/м; X – реактивное сопротивление оболочки или экрана на единицу длины кабеля, Ом/м, вычисляемое по формуле [10]:

$$X = 2\omega \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{2s}{d_s}\right),$$

где $\omega = 2\pi f$, 1/с; s – расстояние между осями жил в данной электрической секции, мм; d_s – средний диаметр экрана, мм.

Наведенное напряжение на экране

При одностороннем заземлении экранов на незаземленном конце возникает наведенное напряжение, которое может представлять опасность для персонала и оборудования. Напряжение, наведенное на незаземленном конце секции экрана при одностороннем заземлении или секции транспо-

зиции в симметричном режиме при прокладке кабелей треугольником, определяем по выражению [11]

$$U_3 = I l X, \text{ В/м}, \quad (1)$$

где I – ток, протекающий по линии (длительно допустимый ток, либо ток короткого замыкания), А; l – длина линии, м;

Для одножильных кабелей напряжением 10 кВ, проложенных треугольником, с сечением жил 50–1000 и экранов 16–240, U_3 оказалось в пределах 10–43 В/км (большие значения характерны для больших сечений). При токе короткого замыкания 20 кА наведенное напряжение для этих кабелей составило около 950,1060 В/км.

Для одножильных кабелей напряжением 110 кВ, проложенных треугольником, с сечением жил 150–1200 и экранов 70–300, U_3 оказалось в пределах 15–44 В/км. При токе короткого замыкания 30 кА наведенное напряжение для этих кабелей равно 1394–1425 В/км.

Наведенное напряжение на экране должно удовлетворять условию электробезопасности

$$U_3 \leq U_{\text{доп}},$$

где $U_{\text{доп}}$ – допустимое напряжение на разомкнутом конце экрана кабеля.

В различных источниках это значение варьируется от 25 В [12] до 100 В [13], а в некоторых странах допускаются значения до 400 В [4].

На основании этого ограничения можно определить предельную длину кабельной линии с односторонним заземлением экранов. В табл. 1 представлены расчетные значения предельной длины кабельной линии напряжением 110 кВ при прокладке треугольником по условию наведенного напряжения на экране при ограничении 25 В.

Данные табл. 1 показывают, что с увеличением сечения жилы критическая длина линии с односторонним заземлением экранов уменьшается. Это по большей части связано с увеличением тока в жиле и соответственно наведенного напряжения на экране.

Пропускная способность силовой кабельной линии

Для оценки длительно допустимых токов использовалась методика, представленная в стандартах [10, 14], для небронированного одножильного кабеля длительно допустимый ток составляет

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5T_1 + T_3 + T_4]}{RT_1 + R(1 + \lambda_1)(T_3 + T_4)} \right]^{0,5}, \quad (1)$$

где $\Delta\theta$ – превышение температуры жилы кабеля над средней температурой окружающей среды, °С; W_d – диэлектрические потери в изоляции, Вт/м; R – сопротивление жилы кабеля переменному току на единицу длины кабеля при максимальной рабочей температуре, Ом/м; λ_1 – отношение потерь мощности в экране к общим потерям в жилах кабеля;

T_1, T_3, T_4 – тепловое сопротивление изоляции, оболочки, окружающей среды, К·м/Вт;

Результаты расчетов длительно допустимых токов нагрузки одножильных кабелей напряжением 110 кВ, проложенных треугольником в земле, для различных схем заземления экранов представлены в табл. 2.

Таблица 1

**Предельная длина кабельной линии напряжением 110 кВ
при прокладке треугольником по условию наведенного напряжения
на экране при ограничении 25 В, км**

**Maximum length of a 110 kV cable line when laid in a triangle under the condition
of induced voltage on the screen with a limit of 25 V, km**

Площадь поперечного сечения жилы, мм ²	150	185	240	300	400	500	630	800	1000	1200
Критическая длина линии, км	1,50	1,34	1,18	1,05	0,90	0,81	0,72	0,64	0,58	0,50

Таблица 2

**Длительно допустимые токи нагрузки одножильных кабелей напряжением 110 кВ,
проложенных треугольником в земле**

**Long-term permissible load currents of single-core cables with a voltage of 110 kV
laid in a triangle in the ground**

Площадь поперечного сечения жилы, мм ²	Площадь поперечного сечения экрана, мм ²													
	Двустороннее заземление							Одностороннее или транспозиция						
	70	95	120	150	185	240	300	70	95	120	150	185	240	300
150	305	305	304					309	309	309				
185	341	340	339	337				346	346	347	347			
240	391	389	387	385	383			398	399	399	399	400		
300	439	436	433	430	428	425		449	449	450	450	451	451	
400	506	502	497	493	489	484	481	522	523	523	523	524	525	526
500	566	559	553	547	542	535	531	588	588	589	589	590	591	592
630	633	624	616	607	600	591	585	664	665	665	665	666	667	669
800	708	696	685	673	663	651	643	752	752	752	753	754	755	756
1000	782	766	751	736	723	707	697	841	841	842	842	844	845	846
1200	872	849	830	810	792	772	758	954	955	955	955	957	958	960

Анализ данных табл. 2 показывает, что переход от двустороннего заземления к одностороннему или транспозиции приводит к увеличению пропускной способности кабельной линии на 1–26 % в зависимости от сечения жилы и экрана кабеля. Наибольший эффект наблюдается для кабелей с большим сечением жилы и экрана, что объясняется более значительными потерями в экранах при двустороннем заземлении для таких кабелей.

Важно отметить, что в условиях эксплуатации сечение жил должно удовлетворять требованиям предельного длительно допустимого нагрева в нормальном и послеаварийном режимах. Это техническое ограничение необходимо учитывать при выборе схемы заземления экранов.

Приведенные затраты для силовой кабельной линии

Для технико-экономической оптимизации схемы заземления экранов силовых кабельных линий в качестве критерия целесообразно использовать минимум приведенных затрат. Приведенные затраты представляют собой сумму эксплуатационных издержек и капитальных вложений, приведенных к одному году эксплуатации [15]:

$$З = (E + p_a)K + И, \quad (2)$$

где E – нижняя граница эффективности капиталовложений, принимаемая не ниже ставки за предоставление кредита или за хранение средств в банке; p_a – коэффициент отчислений на амортизацию; K – стоимость кабельной линии, руб.; $И$ – ежегодные издержки, руб.

Капитальные затраты на сооружение кабельной линии при двустороннем заземлении могут быть представлены

$$K_d = C_k + C_n,$$

где C_k – стоимость кабеля и муфт, руб.; C_n – то же прокладки кабельной линии, руб.

Для схемы с односторонним заземлением экранов

$$K_o = C_k + C_n + C_o,$$

где C_o – стоимость сооружения одностороннего заземления, руб.

Для схемы с транспозицией экранов капитальные затраты составят

$$K_t = C_k + C_n + C_t,$$

где C_t – стоимость сооружения полного цикла транспозиции, руб.

Эксплуатационные издержки для каждой схемы заземления определяются стоимостью потерянной электроэнергии в жилах и экранах кабелей

$$И = 3I_p^2 R \tau \beta \cdot 10^{-3},$$

где I_p – расчетный ток линии, А; R – эквивалентное электрическое сопротивление кабеля (с учетом поверхностного эффекта, эффекта близости и потерь в экране) [16], Ом; τ – эквивалентное время максимальных потерь; β – тариф на электроэнергию в электрической сети, руб./(кВт·ч).

Результаты и обсуждение

Определение наилучшего по приведенным затратам технического решения зависит от большого количества параметров, включая длину линии, сечение жилы и экрана, способ прокладки, тариф на электроэнергию и дру-

гие. Это не позволяет использовать упрощенные методы, такие как экономическая плотность тока или экономические интервалы, для выбора площади поперечного сечения жилы и схемы заземления экранов кабелей.

Таким образом, выбор оптимальной схемы заземления экранов требует перебора всех возможных вариантов с учетом технических ограничений и экономических показателей. Перебор может быть реализован в компьютерном программном обеспечении.

На примере кабельной линии напряжением 110 кВ (рис. 2) построена номограмма областей применимости схем заземления экранов в координатах «расчетный ток – длина», которые обеспечивают минимум приведенных затрат.

Использование той или иной схемы заземления экранов определяется комплексом факторов, включающих как технические ограничения (наведенное напряжение, пропускную способность, электробезопасность), так и экономические показатели (капитальные затраты, потери энергии, издержки на обслуживание).

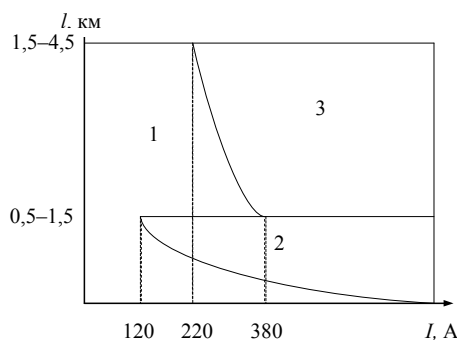


Рис. 2. Область применимости схем заземления экранов по критерию минимума приведенных затрат:
1 – двустороннее заземление;
2 – одностороннее заземление;
3 – один цикл транспозиции

Fig. 2. Scope of applicability of screen grounding schemes according to the criterion of minimum reduced costs:
1 – two-sided grounding;
2 – one-sided grounding;
3 – one cycle of transposition

Двустороннее заземление экранов целесообразно для линий с относительно невысокой токовой нагрузкой. Ориентировочные расчеты показывают: граница перехода к транспозиции находится в диапазоне токов нагрузки 220–380 А, переход к одностороннему становится экономически оправданным при токе приблизительно 120 А (при $\tau = 2000$ ч).

Для применения одностороннего заземления экранов на линиях большей протяженности требуется рассмотреть использование нескольких последовательных секций одностороннего заземления. Фактически три последовательные секции с односторонним заземлением эквивалентны в снижении наведенных напряжений одному полному циклу транспозиции и позволяют увеличить общую протяженность линии до 1,5–4,5 км. Учитывая, что сооружение трех таких секций экономически более выгодно, чем сооружение цикла транспозиции (за счет меньшей стоимости), данный вариант может быть предпочтительнее. Если бы такая схема была отображена на номограмме, она бы заняла всю область, соответствующую транспозиции, а область двустороннего заземления уменьшилась бы.

Предложенная методика развивает подходы, описанные в работах [5–7], дополняя их тем, что задача выбора схемы заземления экранов решается в рамках метода приведенных затрат.

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика технико-экономического выбора схемы заземления экранов силовых кабельных линий, позволяющая определить оптимальный вариант с учетом минимума приведенных затрат и технических ограничений. Данный подход учитывает влияние схемы заземления на наведенное напряжение, циркулирующие токи в экранах и пропускную способность кабельных линий.

2. Одностороннее заземление, включая многосекционное исполнение, представляется экономически предпочтительным решением по отношению к транспозиции экранов. Двустороннее заземление оптимально для линий с относительно невысокой токовой нагрузкой и длиной, где издержки на потери электроэнергии не превышают затраты на дополнительные капиталовложения, связанные с транспозицией экранов или односторонним заземлением.

3. Выбор схемы заземления экранов существенно влияет на пропускную способность кабельной линии: при переходе от двустороннего заземления к одностороннему или транспозиции пропускная способность увеличивается на 1–26 % в зависимости от сечения жилы и экрана кабеля.

4. Практическое применение разработанной методики при проектировании силовых кабельных линий позволит повысить их экономическую эффективность и техническую надежность за счет оптимального выбора схемы заземления экранов с учетом конкретных условий прокладки и эксплуатации.

5. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка программного обеспечения для автоматизации процесса выбора оптимальной схемы заземления экранов с учетом всех технических и экономических факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Czapp, S. Safety Issues Referred to Induced Sheath Voltages in High-Voltage Power Cables—Case Study / S. Czapp, K. Dobrzynski // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, No 19. Art. 6706. <https://doi.org/10.3390/app10196706>.
2. Способы заземления экранов кабелей / А. А. Антонов, Ю. П. Гусев, Ю. Гусев [и др.] // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2016. № 5 (38). С. 86–91.
3. Zhao, T. Sheath Bonding Equipment for AC Transmission Cable Systems / T. Zhao // *Accessories for HV and EHV Extruded Cables*. Vol. 2: Land and Submarine AC/DC Applications. Cham: Springer International Publishing, 2023. P. 487–571. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80406-0_8.
4. IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV: IEEE Std 575-2014. IEEE, 2014. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6905681>.

5. Дмитриев, М. Выбор и реализация схем заземления экранов однофазных кабелей 6–500 кВ / М. Дмитриев // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2013. № 6 (21). С. 90–97.
 6. Буре, И. Г. Влияние системы заземления экранов на выбор сечения кабельной линии с изоляцией из сшитого полиэтилена / И. Г. Буре, И. М. Хевсуриани, А. В. Быстров // *Электротехника*. 2016. № 11. С. 72–78.
 7. Быстров, А. В. Выбор системы заземления экранов при расчете сечения кабелей 6–500 кВ / А. В. Быстров, И. М. Хевсуриани // *Промышленная энергетика*. 2014. № 7. С. 19–23.
 8. 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 and Computer Engineering (IJECE)*. 2011. Vol. 2, No 1. <https://doi.org/10.11591/ijece.v2i1.115>.
 9. 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>.
 10. 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. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/164f72dc-b67a-496b-af43-97e28a944a7b/iec-60287-1-1-2023>.
 11. Бронгулеева, М. Н. Кабельные линии высокого напряжения / М. Н. Бронгулеева, С. С. Городецкий. Л.–М.: Госэнергоиздат, 1963. 512 с.
 12. Подгайский, С. И. Силовые электрические кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена: диссертация ... 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. IEC 60287-2-1:2023. Calculation of the Current Rating. Part 2–1: Thermal Resistance – Calculation of Thermal Resistance. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/9a2a6795-afb1-4194-97ae-9eef8d36e808/iec-60287-2-1-2023>.
 15. Герасименко, А. А. Электрические системы и сети: учеб. пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. Ростов-на-Дону: Феникс, 2023. 473 с.
 16. 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. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/22c648b0-31da-4b8b-a73c-90355e4d7914/iec-60287-3-2-2012>.
- Поступила 10.01.2025 Подписана в печать 18.03.2025 Опубликована онлайн 30.09.2025

REFERENCES

1. Czapp S., Dobrzynski K. (2020) Safety Issues Referred to Induced Sheath Voltages in High-Voltage Power Cables–Case Study. *Applied Sciences*, 10 (19), 6706. <https://doi.org/10.3390/app10196706>.
2. Antonov A., Gusev O., Gusev Yu. Monakov Yu., Oknin E., Cho G. Ch. (2016) Methods of Grounding Cable Screens. *Elektroenergiya. Peredacha i Raspredelenie = Electric Power. Transmission and distribution*, (5), 86–91 (in Russian).
3. Zhao T. (2023) Sheath Bonding Equipment for AC Transmission Cable Systems. *Accessories for HV and EHV Extruded Cables. Vol. 2: Land and Submarine AC/DC Applications*. Cham: Springer International Publishing, 487–571. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80406-0_8.
4. IEEE Std 575-2014. *IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6905681>.
5. Dmitriev M. (2013) Selection and Implementation of Grounding Schemes for Shields of Single-Phase Cables 6-500 kV. *Elektroenergiya. Peredacha i Raspredelenie = Electric Power. Transmission and distribution*, (6), 90–97 (in Russian).

6. Bure I. G., Khevsuriani I. M., Bystrov A. V. (2016) Influence of the Shield Grounding System on the Selection of the Cross-Section of a Cable Line with Cross-Linked Polyethylene Insulation. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], (11), 72–78.
7. Bystrov A. V., Khevsuriani I. M. (2014) Selection of a Shield Grounding System When Calculating the Cross-Section of 6-500 kV Cables. *Promyshlennaya Energetika = Industrial Power Engineering*, (7), 19–23 (in Russian).
8. 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>.
9. 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. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (6), 488–500. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-488-500> (in Russian).
10. 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>.
11. Bronguleeva M. N., Gorodetsky S. S. (1963) *High Voltage Cable Lines*. Leningrad–Moscow, Gosenergoizdat Publ. 512 (in Russian).
12. Podgaytsky S. I. (2022) *Power Electric Cables with Cross-Linked Polyethylene Insulation* [Dissertation]. Minsk, Belarusian National Technical University. 154 (in Russian).
13. Dmitriev M. V. (2021) *High Voltage Cable Lines*. Saint Petersburg, Polytekhn-Press Publ. 688 (in Russian).
14. 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>.
15. Gerasimenko A. A., Fedin V. T. (2023) *Electrical Systems and Networks*. Rostov-on-Don, Fenix Publ. 473 (in Russian).
16. 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>.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-428-441>

УДК 539.172:543.522

Имитационное моделирование и вероятностный анализ безопасности в управлении рисками АЭС

Е. П. Корсак¹⁾, В. А. Романко¹⁾

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

Реферат. Статья посвящена актуальным вопросам энергетической безопасности и управления рисками в атомной энергетике Республики Беларусь. Авторы рассматривают стратегическую значимость развития ядерной энергетики для обеспечения энергетической независимости страны, а также анализируют последствия крупных аварий на АЭС (Три-Майл-Айленд, Чернобыль, Фукусима), подчеркивая необходимость совершенствования методов оценки и минимизации рисков. Особое внимание уделено методологии вероятностного анализа безопасности (ВАБ), который применяется для анализа надежности систем, включая моделирование аварийных сценариев с использованием деревьев отказов. На примере системы фильтрации воды ААР атомной электростанции демонстрируется практическое применение метода: построены деревья отказов, рассчитана вероятность отказа системы и выявлены ключевые уязвимости (отказы электроснабжения насосов). Проведен сравнительный анализ методов оценки рисков (корректировка нормы дисконта, экспертные оценки, метод Монте-Карло и др.), выделены их преимущества и ограничения. Подчеркивается, что имитационное моделирование и ВАБ обеспечивают наиболее комплексный подход к управлению рисками, сочетая анализ технологических процессов и человеческого фактора. На основе результатов исследования предложены рекомендации по повышению надежности эксплуатации АЭС, включая регулярный мониторинг оборудования и усовершенствование систем безопасности.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, атомная энергетика, управление рисками, имитационное моделирование, вероятностный анализ безопасности, деревья отказов

Для цитирования: Корсак Е. П. Имитационное моделирование и вероятностный анализ безопасности в управлении рисками АЭС / Е. П. Корсак, В. А. Романко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 5. С. 428–441. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-428-441>

Simulation Modeling and Probabilistic Safety Analysis in Nuclear Power Plant Risk Management

K. P. Korsak¹⁾, V. A. Romanko¹⁾

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

Abstract. The article is devoted to current issues of energy security and risk management in the nuclear energy industry of the Republic of Belarus. The authors examine the strategic importance

Адрес для переписки

Корсак Екатерина Павловна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 242-75-35
eo@bntu.by

Address for correspondence

Korsak Katsiaryna P.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 242-75-35
eo@bntu.by

of developing nuclear energy to ensure the country's energy independence, and also analyze the consequences of major accidents at nuclear power plants (Three Mile Island, Chernobyl, Fukushima), emphasizing the need to improve methods for assessing and minimizing risks. Particular attention is paid to the methodology of probabilistic safety analysis (PSA), which is used to analyze the reliability of systems, including modeling emergency scenarios using fault trees. The practical application of the method is demonstrated using the example of the AAR water filtration system of a nuclear power plant: fault trees are constructed, the probability of system failure is calculated, and key vulnerabilities (pump power supply failures) are identified. A comparative analysis of risk assessment methods (adjustment of the discount rate, expert assessments, the Monte Carlo method, etc.) was conducted, and their advantages and limitations were highlighted. It is emphasized that simulation modeling and PSA provide the most comprehensive approach to risk management, combining the analysis of technological processes and the human factor. Based on the results of the study, recommendations are proposed to improve the reliability of nuclear power plant operation, including regular monitoring of equipment and improvement of safety systems.

Keywords: energy security, nuclear energy, risk management, simulation, probabilistic safety analysis, fault trees

For citation: Korsak K. P., Romanko V. A. (2025) Simulation Modeling and Probabilistic Safety Analysis in Nuclear Power Plant Risk Management. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (5), 428–441. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-428-441> (in Russian)

Введение

В настоящий момент многие страны, в том числе и Республика Беларусь, продолжают успешно эксплуатировать АЭС и приняли решение присоединиться к ядерному энергетическому сообществу. Развитие атомной энергетики имеет стратегическое значение для обеспечения энергетической безопасности и экономической независимости страны по целому ряду причин. Во-первых, оно позволяет значительно снизить зависимость от импорта энергоресурсов, диверсифицировать энергетический баланс и обеспечить стабильность энергоснабжения независимо от внешнеполитической конъюнктуры. Во-вторых, атомная энергетика дает существенные экономические преимущества – долгосрочную экономию на топливных затратах (всего 1 кг урана заменяет около 3 т угля), создает высокотехнологичные рабочие места и стимулирует развитие смежных отраслей промышленности, а также научно-технического прогресса. Важным аргументом в пользу развития атомной энергетики являются ее экологические преимущества. По сравнению с традиционной энергетикой АЭС обеспечивают существенное снижение выбросов CO₂ и минимизацию углеродного следа при производстве электроэнергии, что особенно актуально в контексте глобальных климатических изменений. Кроме того, современные ядерные технологии демонстрируют постоянное совершенствование – внедряются реакторы нового поколения с улучшенными характеристиками безопасности, развиваются технологии замкнутого ядерного топливного цикла, совершенствуются системы интеграции с возобновляемыми источниками энергии.

Таким образом, атомная энергетика представляет собой стратегический выбор, который сочетает в себе экономическую целесообразность, энергетическую безопасность и экологическую ответственность, что крайне важ-

но для обеспечения устойчивого развития страны в долгосрочной перспективе [1, 2].

К сожалению, крупные аварии в мировой ядерной энергетике, произошедшие в 1979 г. на АЭС Три-Майл-Айленд (США), в 1986 г. на Чернобыльской АЭС (СССР) и в 2011 г. на АЭС Фукусима-дайити (Япония), стали переломными моментами в восприятии атомной энергетики мировым сообществом. Каждая из этих катастроф, имея свою уникальную природу и последствия, продемонстрировала потенциальные риски, связанные с эксплуатацией ядерных объектов.

Авария на Три-Майл-Айленд (уровень 5 по шкале INES) выявила проблемы в проектировании систем безопасности и подготовке персонала. Чернобыльская катастрофа (уровень 7) стала беспрецедентной по масштабам радиационного загрязнения, показав опасность конструктивных недостатков реакторов РБМК. Фукусима (уровень 7) продемонстрировала уязвимость АЭС перед природными катаклизмами и важность учета внешних угроз. Эти события не только привели к человеческим жертвам, экологическому ущербу и огромным экономическим потерям, но и вызвали глубокий кризис доверия к ядерной энергетике со стороны населения и правительств многих стран.

Однако важно отметить, что каждая из этих катастроф привела к существенному совершенствованию систем безопасности, разработке новых протоколов и созданию более строгих регуляторных требований, что в целом повысило надежность современных ядерных технологий.

Основная часть

С вводом в эксплуатацию первой Белорусской атомной электростанции вопросы оценки и управления рисками приобрели статус приоритетных задач государственной важности. Атомная энергетика, обладая значительным потенциалом для экономического и энергетического развития, несет в себе серьезные риски, способные оказать долгосрочное влияние на здоровье населения, экологическую обстановку и безопасность страны. Последствия возможных инцидентов в этой сфере могут растянуться на десятилетия, нанося урон как человечеству, так и окружающей среде [1].

Прежде чем обсуждать подходы к управлению рисками, необходимо четко определить, что именно подразумевается под этим понятием. Понимание природы риска, его источников и факторов воздействия является ключом к разработке эффективных мер по его минимизации.

Фундаментальный принцип обеспечения безопасности базируется на обратной зависимости между вероятностью реализации нежелательного события и допустимой тяжестью его последствий: с ростом частоты возникновения аварийной ситуации требования к смягчению ее воздействий ужесточаются. Данная концепция формализуется через категорию риска, являющегося ключевым параметром в вероятностном анализе безопасности (ВАБ).

В методологии ВАБ риск количественно определяется как математическое ожидание ущерба, выражаемое произведением

$$R = PC,$$

где R – интегральный риск; P – вероятность возникновения события; C – ожидаемая величина последствий (ущерб).

Регламентирующие документы детализируют эту дефиницию, выделяя популяционный подход, – риск определяется как статистическая вероятность причинения вреда (включая радиационное воздействие), оцениваемая по частоте проявления негативных последствий в расчете на стандартизированную группу населения (случаев на миллион человек).

Существует огромное количество определений риска. В стандарте применяются следующие термины с соответствующими определениями: риск (risk) – сочетание вероятности события и его последствий [3]. Термин «риск» обычно используется тогда, когда существует хотя бы возможность негативных последствий. Анализ риска (risk analysis) – систематическое использование информации для определения источников и количественной оценки риска. Анализ риска обеспечивает базу для его оценивания, мероприятий по снижению и принятию риска. Управление рисками (risk-менеджмент) – это процесс подготовки и реализации мероприятий, имеющих целью снизить опасность ошибочного решения и уменьшить возможные негативные последствия нежелательного развития событий в ходе реализации принятых решений [4]. Управление риском может включать мониторинг, переоценивание и соответствие принятым решениям. Первым шагом в управлении рисками является идентификация возможных рисков.

Выявление и идентификация рисков являются важным этапом, позволяющим сформировать эффективную систему управления рисками, так как только на четко обозначенный объект можно оказать управленческое воздействие, в то время как не выявленные риски могут оказать непредсказуемое, а в некоторых случаях и катастрофическое влияние на деятельность предприятия [5, с. 198]. На основе этой информации проводятся дальнейшие исследования и оценки, которые помогают понять, насколько вероятны те или иные события и каковы их возможные последствия.

Оценка потенциальных рисков производится простейшими методами, например корректировкой нормы дисконта или методом анализа чувствительности изменения основных показателей эффективности, закрепленных в Правилах по разработке бизнес-планов инвестиционных проектов, утвержденных постановлением Министерства экономики Республики Беларусь от 31.08.2005 № 158 (далее – Правила). Практика показывает их недостаточность. Иногда используются и более продвинутые методы оценки проектного риска, такие как имитационное моделирование, в частности метод Монте-Карло. При этом еще более редко встречаются такие «изолированные» методы оценки проектного риска, как метод ликвидационной стоимости, или риск-анализ, основанный на теории нечетких множеств. Основные преимущества, недостатки и область применения различных методов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Методы оценки рисков

Risk assessment methods

Метод	Преимущества	Недостатки	Область применения
Метод коррекции нормы дисконта	– основан на повышении исходной безрисковой ставки дисконтирования за счет включения дополнительной премии, отражающей уровень риска. Главным достоинством метода является минимальная трудоемкость расчетных процедур	– имеет ограничения возможностей моделирования различных вариантов; – чрезмерно чувствителен к изменениям в параметрах финансовой модели	– оценка инвестиционных проектов; – бизнес-планирование и стратегическое управление; – управление проектными рисками
Метод экспертных оценок	– создается группа экспертов, включающая профессионалов в области инвестиционного анализа, строительной отрасли и финансового менеджмента; – каждый участник экспертной группы независимо оценивает все категории рисков, формируя индивидуальные выводы по каждому из них	– дефицит профильных специалистов, способных проводить квалифицированную оценку; – субъективность результатов, обусловленная личным опытом и компетенциями привлекаемых экспертов; – потенциальное искажение данных из-за устойчивых когнитивных искажений в экспертной среде	– инвестиционный и финансовый анализ; – стратегическое планирование и маркетинг; – научные исследования и разработки; – риск-менеджмент
Анализ чувствительности	– не нуждается в привлечении дополнительных данных, используя только имеющиеся исходные параметры; – наглядно демонстрирует зависимость конечных результатов проекта от изменения ключевых входных переменных	– «тоннельный» анализ, игнорирующий синергетический эффект взаимодействующих факторов; – искусственное выделение одного изменяемого параметра при неизменности прочих условий	– инвестиционный и финансовый анализ; – управление проектами; – стратегическое планирование; – научные исследования и разработки
Метод сценариев развития проекта	– формирует прозрачную сравнительную матрицу результатов для различных стратегий выполнения проекта; – выявляет степень влияния изменяющихся факторов на результирующие экономические показатели	– направленность исследования только на поведение результирующих показателей (NPV, IRR, PI); – отсутствие учета возможности отклонений потоков платежей	– управление проектами; – маркетинг; – производственная деятельность; – государственное управление и социальные проекты
Метод построения «дерева решений»	– предоставляет четкое графическое отображение различных сценариев развития проекта; – позволяет наглядно анализировать потенциальные изменения на всех этапах реализации; – служит эффективным инструментом для диагностики и решения проблемных ситуаций; – дает возможность проводить структурированный анализ сложных проектных задач; – обеспечивает количественную оценку финансовых последствий различных вариантов реализации	– характеризуется: повышенной трудоемкостью расчетных процедур; субъективностью при определении вероятностных характеристик; сложностями в достижении согласованных экспертных оценок	– для оценки рисков инвестиционного проекта, реализуемого в течение длительного времени и имеющего два или более последовательных решений

Окончание табл. 1

End of the Table 1

Метод	Преимущества	Недостатки	Область применения
Имитационное моделирование	– позволяет работать с входными данными со сложной структурой; – позволяет получить весьма надежные результаты, свидетельствующие об устойчивости и доходности проекта	– сложность выполнения вследствие необходимости количественной оценки вероятности для каждого риска; – сложность построения вероятностной модели и множества вычислений	– производство электроэнергии; – энергетические системы и сети; – возобновляемые источники энергии (ВИЭ);
Метод достоверных эквивалентов	– простота расчетов, доступность и понятность; – трудности исчисления коэффициентов достоверности, адекватных риску	– метод может быть неэффективен для высокоразвитых систем или при моделировании быстрых переходных процессов; – сложность разработки эквивалентных моделей; – зависимость от корректности исходных данных	– планирование развития энергосистем: оценка влияния подключения новых объектов генерации или потребления; – планирование развития энергосистем: оценка влияния подключения новых объектов генерации или потребления
Метод ликвидации стоимости и его сущность	– метод не учитывает потенциал компании как действующего предприятия; – в условиях кризиса или низкого спроса активы могут быть проданы с существенным дисконтом; – метод не учитывает ожидаемые потоки доходов от деятельности компании в будущем	– трудоемкий по своей сущности метод и требует наряду с профессиональной командой разработчиков еще и квалифицированный штат оценщиков как в целом бизнеса, так и отдельных имущественных объектов	– оценка риска, связанного с инвестициями в материальные активы – здания, оборудование, товарно-материальные ценности;
Оценка проектного риска с использованием теории нечетких множеств	– позволяет работать с неполной информацией, что особенно важно на ранних этапах проекта; – теория нечетких множеств позволяет адаптироваться к изменениям факторов риска без необходимости пересчета всех показателей проекта; – возможность объединения количественных и качественных данных	– создание функций принадлежности и правил нечеткой логики требует глубоких знаний предметной области; – полученные нечеткие оценки не всегда легко перевести в конкретные количественные или качественные выводы	– анализ рисков при строительстве и эксплуатации энергетических объектов; – оценка надежности энергосистем, учет неопределенности в производстве и потреблении энергии
* Источник: собственная разработка [4, с. 197; 5; 6].			

Из данных таблицы видно, что наукой и практикой предлагается целый спектр методов для оценки рисков, каждый из которых имеет как свои преимущества, так и недостатки. Рассмотрим применение метода имитационного моделирования, основанного на методе Монте-Карло. Важной составляющей этого процесса является вероятностный анализ безопасности, позволяющий количественно оценить риски, связанные с эксплуатацией ядерных объектов, и предпринять меры для их минимизации. Вероятностный анализ безопасности помогает систематизировать данные о рисках и определить, какие сценарии развития событий представляют наибольшую опасность [6].

ВАБ становится все более важным инструментом для проверки детерминистских проектных решений. Он основан на оценке вероятностей отказа ядерной паропроизводящей установки путем разложения на независимые составляющие [7, 8]. Используемые методы дают принципиально новое представление о безопасности проекта и обладают рядом ключевых преимуществ, таких как:

- глубокий анализ технологических процессов, способствующий четкому пониманию взаимодействия оборудования и персонала как в штатных условиях, так и в аварийных ситуациях;
- комплексный подход, обеспечивающий всестороннюю оценку надежности установки и ее уровня безопасности.

Этот анализ позволяет получить более полное и объективное представление о рисках и устойчивости системы [9, 10]. ВАБ в сочетании с анализом запроектных аварий (ЗПА) формирует методологическую основу для:

- селекции аварийных сценариев, требующих разработки управляющих инструкций, на основании их значимого вклада в интегральные показатели безопасности;
- оптимизации защитных мероприятий, направленных на повышение безопасности энергоблока, посредством оценки влияния ключевых систем и оборудования на вероятностные индикаторы надежности.

Рассмотрим систему AAR, которая используется на атомных электрических станциях для фильтрации воды из водоема-охладителя и передачи ее потребителям. Система включает три аппаратных насоса с фильтрами (каждый производительностью 50 %), а также два насоса повышения давления (производительность 100 %). При нормальной эксплуатации в работе постоянно находятся два аппаратных насоса с фильтрами и один насос повышения давления. Технологическая схема системы приведена на рис. 1.

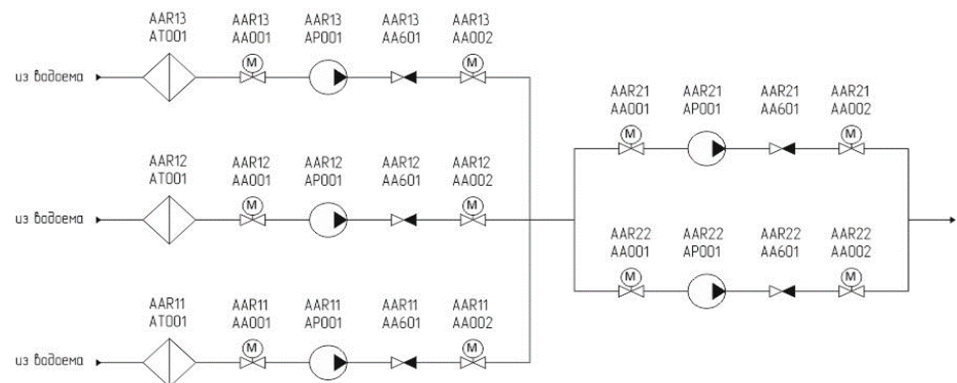


Рис. 1. Технологическая схема системы AAR
(источник: собственная разработка)

Fig. 1. Technological scheme of the AAR system
(source: own development)

Для разработки моделей надежности систем в настоящей работе принята широко используемая в мировой практике методология дерева отказов (ДО).

Графики ДО представляют собой логическую диаграмму в форме дерева (разомкнутого графа), которая включает следующие компоненты:

вершинное событие дерева (отказы системы); промежуточные события, подлежащие анализу в этом дереве; первичные (базисные) события (отказы элементов системы или ошибочные действия персонала) [11].

При моделировании системы не рассматриваются: отказы по общей причине на ложное изменение положения электроприводной арматуры (ЭПА); возможность образования рециркуляции через резервную ветку при ложном открытии ЭПА ввиду наличия обратных клапанов; неготовность оборудования из-за вывода в ремонт; не рассматриваются ошибки персонала (табл. 2).

Таблица 2

Базисные события, моделирующие рассматриваемые отказы

Basic events modeling the failures under consideration

№	Наименование элемента	Маркировка (KKS код)	Тип отказа	Вероятность отказа	Требуемое время работы, ч (Mission Time)	Модель отказа
1	2	3	4	5	6	7
1	Фильтр	AAR13AT001	Засорение	8,20E-07	720	Mission Time (Unrepairable)
2	ЭПА на всасе насоса	AAR13AA001	Отказ на открытие	3,43E-04	–	Probability (Constant)
			Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)
3	Насос с электроприводом	AAR13AP001	Отказ на запуск	5,88E-04	–	Probability (Constant)
			Отказ при работе	8,12E-06	720	Mission Time (Unrepairable)
4	ОК на напоре насоса	AAR13AA601	Отказ на открытие	1,12E-05	–	Probability (Constant)
5	ЭПА на напоре насоса	AAR13AA002	Отказ на открытие	3,43E-04	–	Probability (Constant)
			Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)
6	Фильтр	AAR12AT001	Засорение	8,20E-07	720	Mission Time (Unrepairable)
7	ЭПА на всасе насоса	AAR12AA001	Отказ на открытие	3,43E-04	–	Probability (Constant)
			Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)
8	Насос с электроприводом	AAR12AP001	Отказ на запуск	5,88E-04	–	Probability (Constant)
			Отказ при работе	8,12E-06	720	Mission Time (Unrepairable)
9	ОК на напоре насоса	AAR12AA601	Отказ на открытие	1,12E-05	–	Probability (Constant)
10	ЭПА на напоре насоса	AAR12AA002	Отказ на открытие	3,43E-04	–	Probability (Constant)
			Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)
11	Фильтр	AAR11AT001	Засорение	8,20E-07	720	Mission Time (Unrepairable)
12	ЭПА на всасе насоса	AAR11AA001	Отказ на открытие	3,43E-04	–	Probability (Constant)
			Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)

Окончание табл. 2

End of the Table 2

1	2	3	4	5	6	7
13	Насос с электроприводом	AAR11AP001	Отказ на запуск	5,88E-04	–	Probability (Constant)
			Отказ при работе	8,12E-06	720	Mission Time (Unrepairable)
14	ОК на напоре насоса	AAR11AA601	Отказ на открытие	1,12E-05	–	Probability (Constant)
15	ЭПА на напоре насоса	AAR11AA002	Отказ на открытие	3,43E-04	–	Probability (Constant)
			Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)
16	ЭПА на всасе насоса	AAR21AA001	Отказ на открытие	3,43E-04	–	Probability (Constant)
			Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)
17	Насос повышения давления с электроприводом	AAR21AP001	Отказ на запуск	5,88E-04	–	Probability (Constant)
			Отказ при работе	8,12E-06	720	Mission Time (Unrepairable)
18	ОК на напоре насоса	AAR21AA601	Отказ на открытие	1,12E-05	–	Probability (Constant)
19	ЭПА на напоре насоса	AAR21AA002	Отказ на открытие	3,43E-04	–	Probability (Constant)
			Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)
20	ЭПА на всасе насоса	AAR22AA001	Отказ на открытие	3,43E-04	–	Probability (Constant)
			Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)
21	Насос повышения давления с электроприводом	AAR22AP001	Отказ на запуск	5,88E-04	–	Probability (Constant)
			Отказ при работе	8,12E-06	720	Mission Time (Unrepairable)
22	ОК на напоре насоса	AAR22AA601	Отказ на открытие	1,12E-05	–	Probability (Constant)
23	ЭПА на напоре насоса	AAR22AA002	Отказ на открытие	3,43E-04	–	Probability (Constant)
			Ложное закрытие	2,54E-08	720	Mission Time (Unrepairable)

Моделируются следующие функции, выполняемые системой: фильтрация и передача ее потребителям в течение 720 ч. Моделируемым функциям соответствуют следующие критерии успеха: Функция 1, считается выполненной, если в течение 720 ч в работе находятся два аппаратных насоса с фильтрами и один насос повышения давления, состояние арматуры обеспечивает поступление воды к потребителям рис. 2, 3.

В результате анализа деревьев отказов для моделируемой функции выявлены минимальные сечения отказов, которые представлены на рис. 4.

Среднее значение вероятности отказа системы по Функции 1 составляет 0,00046, что свидетельствует о том, что за 720 ч запланированной работы данной конфигурации до технического обслуживания отказ возможен один раз за 2200 периодов эксплуатации.

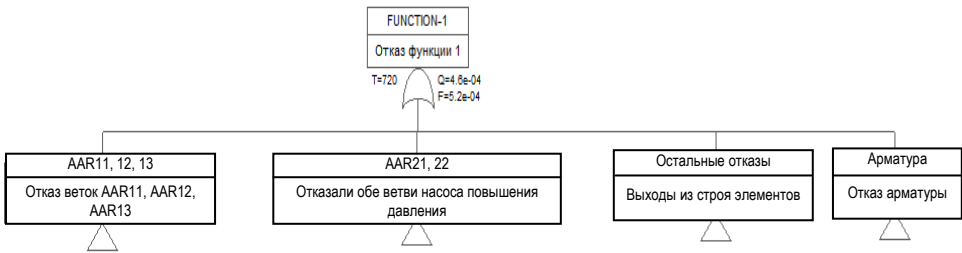


Рис. 2. Дерево отказа FUNCTION-1 – Отказ системы по Функции 1
(источник: собственная разработка)

Fig. 2. Fault tree FUNCTION-1 – System Failure Function 1
(source: own development)

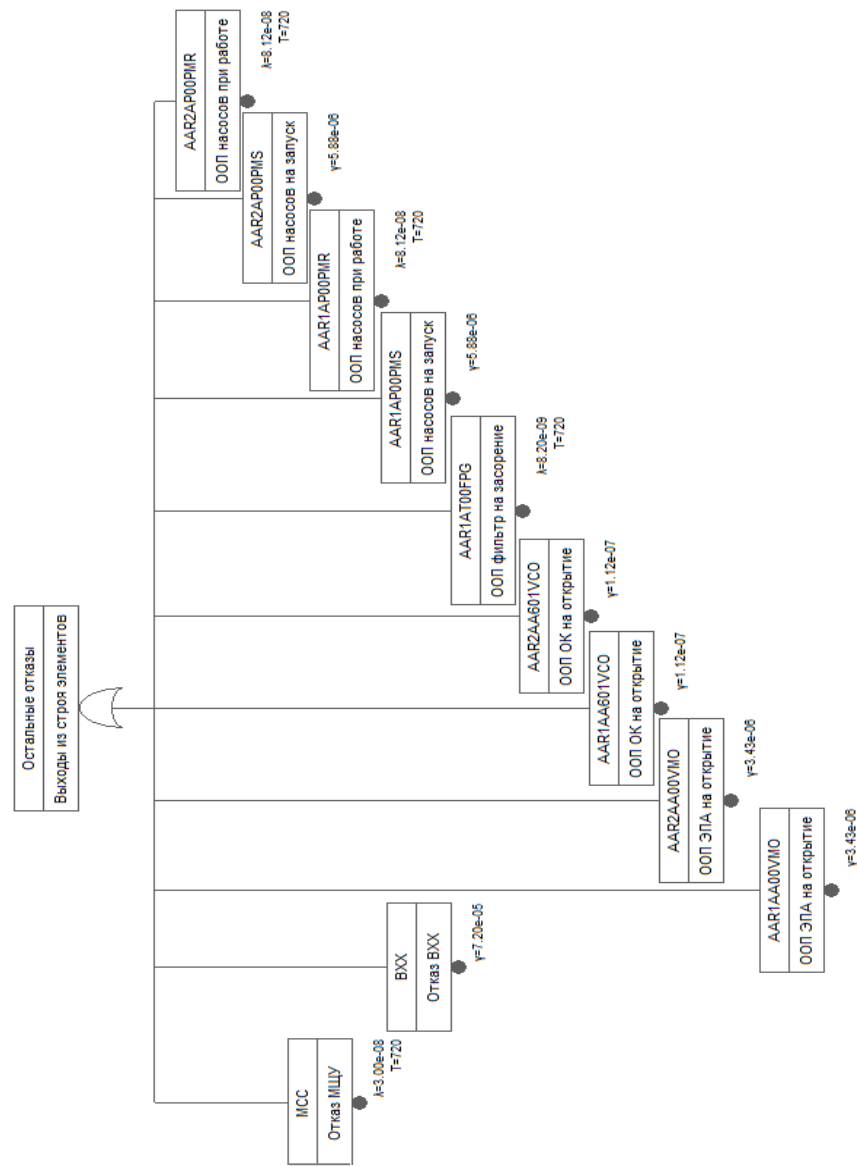


Рис. 3. Дерево отказа – Выходы из строя элементов (источник: собственная разработка)

Fig. 3. Fault tree – Failure of elements (source: own development)

Доминирующие минимальные сечения отказов системы по Функции 1 представлены на рис. 4.

XFTA calculations engine

Mission time: 720

Top gate: FUNCTION-1

Limit:

Exact calculation

Compute

Clipboard

Executive Summary									
		Probabilities	Minimal cuts set	Importance	Sensitivity				
#	Order	Q	%	W	Name	Description			
1	1	7.2e-05	15.4309	0.0	BXX	Отказ BXX			
2	1	5.84623e-05	12.529599999999999	8.11953e-08	AAR1AP00PMR	ООП насосов при работе			
3	1	5.84623e-05	12.529599999999999	8.11953e-08	AAR2AP00PMR	ООП насосов при работе			
4	2	3.39812e-05	7.2828100000000000	9.41167e-08	AAR12AP00PMR	Отказ при работе насоса			
5	2	3.39812e-05	7.2828100000000000	9.41167e-08	AAR13AP00PMR	Отказ при работе насоса			
6	2	3.39812e-05	7.2828100000000000	9.41167e-08	AAR21AP00PMR	Отказ при работе насоса			
7	2	3.39812e-05	7.2828100000000000	9.41167e-08	AAR22AP00PMR	Отказ при работе насоса			
8	1	2.15998e-05	4.62923	2.99994e-08	AAR11AP00PMR	Отказ при работе насоса			
9	1	5.90398e-06	1.2653299999999999	8.19995e-09	AAR13AP00PMR	Отказ при работе насоса			
10	1	5.88e-06	1.26019	0.0	MCC	Отказ МЩУ			
11	1	5.88e-06	1.26019	0.0	AAR1AT00FPG	ООП фильтр на засорение			
12	2	3.44063e-06	0.737391	9.54194e-09	AAR2AP00PMS	ООП насосов на запуск			
13	2	3.44063e-06	0.737391	9.54194e-09	AAR1AP00PMS	ООП насосов на запуск			

Рис. 4. Доминирующие минимальные сечения отказов системы по Функции 1 (источник: собственная разработка на основании расчетов)

Fig. 4. Dominant minimum failure cross-sections of the system according to Function 1 (Source: own development based on)

Результаты расчета показателей надежности системы ААР, которая используется на атомных электрических станциях для фильтрации воды из водоема-охладителя и передачи ее потребителям, показывают, что наибольший вклад в вероятность отказа системы по Функции 1 вносят отказы общего вида электроснабжения насосов и опор осевых подшипников (ООП) насосов при работе. По итогам анализа надежности системы рекомендуется: постоянно осуществлять техническое обслуживание и ремонт насосов; при обнаружении проблем с одним насосом проверять те же характеристики у остальных насосов (при допущении об их одинаковом производителе и конфигурации); постоянно осуществлять контроль за правильной работой электрической сети, которая питает насосы.

ВЫВОДЫ

1. Произведен анализ методов оценки риска, каждый из которых применяется для конкретного случая и обладает как преимуществами, так и недостатками.

2. Рассмотрен метод имитационного моделирования, к которому относится вероятностный анализ безопасности, построены деревья отказов для системы фильтрации воды из водоема-охладителя и подачи ее потребителю на атомных электрических станциях, рассчитано среднее значение вероятности отказа данной системы. Преимуществами данного метода оценки являются возможности работы с входными данными со сложной структурой и проведения анализа надежности систем, моделирование различных сценариев аварий и расчет вероятности их возникновения. Метод позволяет не только выявлять уязвимости, но и разрабатывать меры, обеспечивающие минимизацию возможных последствий.

3. Результаты расчета показателей надежности системы свидетельствуют о том, что наибольший вклад в вероятность отказа системы по Функции 1 вносит отказ электроснабжения насосов и опор осевых подшипников насосов при работе. По итогам анализа надежности системы рекомендуется: постоянно осуществлять техническое обслуживание и ремонт насосов; при обнаружении проблем с одним насосом проверять те же характеристики у остальных (при допущении об их одинаковом производителе и конфигурации); постоянно осуществлять контроль за правильной работой электрической сети, которая питает насосы [12, 14].

ЛИТЕРАТУРА

1. О присоединении Республики Беларусь к Конвенции о ядерной безопасности: Указ Президента Респ. Беларусь от 02.09.1998 № 430 // ЭТАЛОН: информ.-поисковая система (дата обращения: 11.05.2025).
2. Корсак, Е. П. Формирование системы угроз энергетической безопасности Республики Беларусь / Е. П. Корсак // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 4. С. 388–398. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398>.
3. Анализ риска технологических систем: ГОСТ Р 51901–2002. Введ. 07.06.2002. М.: Изд-во стандартов, 2002. 28 с.

4. Тымуль, Е. И. Инструменты риск-менеджмента / Е. И. Тымуль // Модернизация хозяйственного механизма сквозь призму экономических, правовых, социальных и инженерных подходов: сб. материалов X Междунар. науч.-практ. конф., 30 марта 2017 г. / пред. редкол. С. Ю. Солодовников. Минск: БНТУ, 2017. С. 513–514.
5. Тымуль, Е. И. Энергетическая безопасность и управление рисками в энергетике Республики Беларусь / Е. И. Тымуль, Т. Ф. Манцерова, Е. П. Корсак. Минск: БНТУ, 2024. 260 с.
6. Назаров, В. И. Построение математической модели информационной системы для определения оптимального объема отображаемой информации в АСУ тп ТЭС / В. И. Назаров, Е. В. Пронкевич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2008. № 1. С. 61–64.
7. Сорокин, В. В. неравномерности распределения пароводяного теплоносителя в засыпке тепловыделяющих частиц / В. В. Сорокин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2014. № 5. С. 89–96.
8. Экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в тепловыделяющих сборках реакторных установок с водой под давлением / С. М. Дмитриев, А. А. Баринев, А. Н. Пронин [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 6. С. 591–603. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-6-591-603>.
9. Вероятностный анализ безопасности. Минск, 2024. URL: <https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/628/razdel-6-veroyatnostnyy-analiz-bezopasnosti.pdf> (дата обращения: 11.05.2025).
10. Кузнецова, Е. А. Формирование реестра опасностей для оценки рисков / Е. А. Кузнецова // Безопасность и охрана труда. 2016. № 4 (69). С. 28–29.
11. Котлярова, Е. А. Оперативное управление рисками при реализации инвестиционно-строительных проектов: на примере строительства объектов газовой промышленности: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / Е. А. Котлярова; Гос. ун-т упр. М., 2010. 181 л.
12. Острейковский, В. А. Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ / В. А. Острейковский, Ю. В. Швыряев. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 352 с.
13. Гриненко, В. А. Физическая защита радиационно-опасных объектов. Инженернотехнические средства охраны / В. А. Гриненко, А. И. Коростелев. М.: НИЯУ МИФИ, 2014. 252 с.
14. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендации по порядку выполнения анализа надежности систем и элементов атомных станций, важных для безопасности, и их функций» (РБ-100-15). М., 2015. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293766/4293766033.htm> (дата обращения: 11.05.2025).

Поступила 12.05.2025 Подписана в печать 15.07.2025 Опубликована онлайн 30.09.2025

REFERENCES

1. On the Accession of the Republic of Belarus to the Convention on Nuclear Safety: Decree of the President of the Republic of Belarus dated 02.09.1998 г. № 430. *ETALON: Information retrieval System* (accessed 11 May 2025) (in Russian).
2. Korsak E. P. (2019) Formation of the System of Threats to Energy Security of the Republic of Belarus *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (4), 388–398. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398>.
3. State Standard P 51901-2002. *Risk Analysis of Technological Systems*. Moscow, Publishing House of Standards, 2002. 28 (in Russian).
4. Tymul E. I. (2017) Risk Management Tools. *Modernization of the Economic Mechanism through the Prism of Economic, Legal, Social and Engineering Approaches: Collection of materials of the 10th International Scientific and Practical Conference, March 30, 2017*. Minsk, Belarusian National Technical University, 513–514 (in Russian).
5. Tymul E. I., Mantserova T. F., Korsak E. P. (2024) *Energy Security and Risk Management in the Energy Sector of the Republic of Belarus*. Minsk, Belarusian National Technical University. 260 (in Russian).

6. Nazarov V. I., Pronkevich E. V. (2008) Development of Mathematical Model for Data System Applied for Determination of Optimum Information Body Reflected in Automatic Control System TP at Thermal Power Station. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 61–64 (in Russian).
7. Sorokin V. V. (2014) Non-Uniformities of Two-Phase Coolant Distribution in a Heat Generating Particles Bed / V. V. Sorokin. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 89–96 (in Russian).
8. Dmitriev S. M., Barinov A. A., Pronin A. N., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2016) Experimental Study of Local Hydrodynamics and Mass Exchange Processes of Coolant in Fuel Assemblies of Pressurized Water Reactors. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (6), 591–603. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-6-591-603> (in Russian).
9. *Probabilistic Safety Analysis*. Minsk, 2024. Available at: <https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/628/razdel-6-veroyatnostnyy-analiz-bezopasnosti.pdf> (accessed 11 May 2025) (in Russian).
10. Kuznetsova E. A. (2016) Formation of a Hazard Register for Risk Assessment. *Bezopasnost i Okhrana Truda = Safety and labor protection*, (4), 28–29 (in Russian).
11. Kotlyarova E. A. (2010) *Operational Risk Management in the Implementation of Investment and Construction Projects: on the Example of the Construction of Gas Industry Facilities* [Dissertation]. Moscow, State University of Management. 181 (in Russian).
12. Ostreykovsky V. A., Shvyryaev Yu. V. (2008) *Safety of Nuclear Power Plants. Probabilistic Analysis*. Moscow, FIZMATLIT Publ. 352 (in Russian).
13. Grinenko V. A., Korostelyov A. I. *Physical Protection of Radiation Hazardous Objects. Engineering and Technical Means of Protection*. Moscow, National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute. 252 (in Russian).
14. *Safety Guide for the Use of Nuclear Energy “Recommendations on the Procedure for Conducting Reliability Analysis of Nuclear Power Plant Systems and Elements Important to Safety and Their Functions”* (RB-100-15). Moscow, 2015. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293766/4293766033.htm> (accessed 11 May 2025) (in Russian).

Received: 12 May 2025

Accepted: 15 July 2025

Published online: 30 September 2025

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-442-456>

УДК 621.313

Биогаз и свалочный газ как источники возобновляемой энергии в Республике Беларусь

Е. В. Зеленухо¹⁾, А. А. Цыганова¹⁾, Г. В. Бельская¹⁾

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

Реферат. Энергетическая политика Республики Беларусь направлена на снижение потребления углеводородного сырья и укрепление национальной энергетической безопасности. Стратегической задачей отмечено максимальное вовлечение в топливно-энергетический баланс, помимо атомной энергии, собственных топливно-энергетических ресурсов, включая возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Развитие ВИЭ способствует декарбонизации хозяйственной деятельности. Ресурсный потенциал получения биогаза в Республике Беларусь с учетом динамики образования органического сырья составляет 3,265 млн т у. т. в год, что намного выше аналогичных показателей для других местных видов топлива. В стране биогаз получают влажной и сухой ферментацией. Влажную ферментацию используют для получения биогаза из органических отходов животноводства (вторичной биомассы), которые содержат высокую влажную фракцию – до 90 %. Используемым оборудованием являются биореакторы и когенерационные установки. Сухую ферментацию применяют для получения свалочного газа из твердых органических отходов жилищно-коммунального хозяйства с использованием газопоршневых агрегатов (установок по дегазации органических отходов). В настоящее время выработка биогаза влажным и сухим (полувлажным) сбраживанием составляет приблизительно по 50 %. Современные технологии ко-сбраживания позволяют моделировать состав используемых органических отходов посредством приготовления ко-субстратов, причем чрезвычайно разнообразных, без принципиальных ограничений. Этот инновационный прием регулирует скорость микробиологического процесса, обеспечивает равномерную загрузку биогазового оборудования в течение календарного года, повышает экономическую эффективность работы биогазовых установок без высоких инвестиционных затрат. Такой подход в применении биогазовых технологий дает новый качественный толчок к их развитию, одновременно уменьшая объемы складирования органических отходов и снижая национальный углеродный след. Использование ко-субстратов обеспечивает технологические, экономические и экологические преимущества, поскольку выход метана в этих условиях достаточно стабильный и гарантированный. В настоящее время сложились специфические условия для функционирования «зеленой» энергетики. Целесообразно с учетом новых экономических условий частично переориентировать хозяйственную деятельность крупных биогазовых заводов на производство тепловой энергии, получение органического удобрения и других ценных продуктов с добавленной стоимостью.

Ключевые слова: биогаз, свалочный газ, возобновляемые источники энергии, влажная и сухая ферментация, управление органическими отходами, декарбонизация производственной деятельности

Для цитирования: Зеленухо, Е. В. Биогаз и свалочный газ как источники возобновляемой энергии в Республике Беларусь / Е. В. Зеленухо, А. А. Цыганова, Г. В. Бельская // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 5. С. 442–456. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-442-456>

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

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

Biogas and Landfill Gas as Sources of Renewable Energy in the Republic of Belarus

A. V. Zelianukha¹⁾, H. A. Tsyhanava¹⁾, H. V. Belskaya¹⁾

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

Abstract. The energy policy of the Republic of Belarus is aimed in reducing the consumption of hydrocarbon raw materials and strengthening the national energy security. The strategic aim is to maximally involve in the fuel and energy balance, in addition to nuclear energy, our own fuel and energy resources, including renewable energy sources (RES). The development of RES contributes to the decarbonization of economic activity. The resource potential for biogas production in the Republic of Belarus, taking into account the dynamics of organic raw material formation, is about 3.265 million tons of equivalent fuel per year, which is much higher than similar indicators for other local types of fuel. In the country, biogas is produced by wet and dry fermentation. Wet fermentation is used to produce biogas from organic livestock waste (secondary biomass), which contains a high moisture fraction – up to 90 %. The equipment used is bioreactors and co-generation units. Dry fermentation is used to produce landfill gas from solid organic waste of housing and communal services, using gas piston units (organic waste degassing units). Currently, the production of biogas by wet and dry (semi-wet) fermentation is approximately 50% each. Modern co-fermentation technologies allow to model the composition of the organic waste used for preparing co-substrates. Moreover, the composition of the substrates used can be extremely diverse, without fundamental limitations. This innovative technique regulates the stability of the microbiological process, ensures uniform loading of biogas equipment during the calendar year, increases the economic efficiency of biogas plants, without high investment costs. This approach to the application of biogas technologies gives a new qualitative impetus to their development, while simultaneously reducing the volume of organic waste storage and reducing the national carbon footprint. The use of co-substrates provides technological, economic and environmental advantages, since the methane output under these conditions is quite stable and guaranteed. Currently, specific conditions have developed for the functioning of “green” energy. Taking into account the new economic conditions, it is advisable to partially reorient the economic activities of large biogas plants to the production of heat energy, the production of organic fertilizers and other valuable products with added value.

Keywords: biogas, landfill gas, sources of renewable energy, wet and dry fermentation, organic waste management, decarbonization of production activity

For citation: Zelianukha A. V., Tsyhanava H. A., Belskaya H. V. (2025) Biogas and Landfill Gas as Sources of Renewable Energy in the Republic of Belarus. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (5), 442–456. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-442-456> (in Russian)

Введение

Выполнение Государственной программы «Энергосбережение» Республики Беларусь на 2021–2025 гг. направлено на снижение потребления углеводородного сырья и укрепление национальной энергетической безопасности. Стратегической задачей отмечено максимальное вовлечение в топливно-энергетический баланс, помимо атомной энергии, собственных топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), включая возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Развитие ВИЭ способствует декарбонизации хозяйственной деятельности.

В этой сфере наблюдаются определенные успехи. Так, вовлечение в топливно-энергетический баланс ВИЭ (включая биомассу) позволило сэкономить за предыдущие пять лет более 400 тыс. т у. т., или 10,5 %

от общей экономии ТЭР. Доля местных ТЭР в валовом потреблении достигла 16,5 % и увеличилась на 2,3 %. Доля ВИЭ в валовом потреблении ТЭР в 2024 г. достигла 7,1 % и увеличилась на 1,5 % к уровню 2020 г. [1].

Наряду с древесным топливом и торфом, значительного роста достигло производство биогаза – 5-кратное увеличение потребления к указанному периоду. Этих результатов удалось достичь за счет введения в эксплуатацию (за период с 2021 по 2025 г.) 14 новых биогазовых комплексов, суммарная установленная электрическая мощность которых составляет 13,6 МВт. Таким образом, идет успешное выполнение подпрограммы 2 «Развитие использования местных ТЭР, в том числе ВИЭ», в соответствии с которой планируется увеличить долю ВИЭ в валовом потреблении ТЭР на 8 % к 2026 г. [1].

Выполняемая в настоящее время Государственная программа «Энергосбережение» на 2021–2025 гг. является частью Национальной стратегии устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 г. [2]. Седьмой Целью международной стратегии является «обеспечение всеобщего доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех». Выполнение международных обязательств обеспечивается сопоставимостью целевых показателей Государственной программы с индикаторами достижения Целей устойчивого развития. В ближайшее время в стране планируются строительство, реконструкция и модернизация энергоисточников с использованием технологического оборудования, работающего на местных ТЭР, в том числе ВИЭ.

Одним из перспективных направлений является производство возобновляемой энергии биогаза, производство и потребление которого постоянно растет [2]. Нами рассчитан ресурсный потенциал получения биогаза в Республике Беларусь с учетом эколого-экономических особенностей развития, в первую очередь наличия и динамики образования органического сырья, включая отходы. Этот потенциал составляет 3,265 млн т у. т. в год [3]. Примечательно, что эта цифра намного выше аналогичных показателей для других местных видов топлива и потенциала ветровой энергии, уступая потенциалу только солнечной энергии. Это свидетельствует о высокой ценности биогаза в реестре ВИЭ и устойчивой перспективе его производства в ближайшее время.

Особенности современных биогазовых технологий

Биогаз обладает значительными технологическими преимуществами перед другими видами ВИЭ – его можно производить, сохранять, накапливать и транспортировать без существенных потерь. Производство биогаза является отраслью циркулярной («зеленой») экономики, поскольку исходным сырьем для процессов метаногенеза являются дешевые органические материалы, включая отходы жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) и промышленности. Помимо производства метана, биогазовые технологии обеспечивают уменьшение объемов складирования отходов, снижают выбросы парниковых газов, в том числе аммиака, с полигонов хранения твердых бытовых отходов (ТБО), минимизируют загрязнение поверхностных, подземных вод и почв органическими веществами и нитратами [4]. Сжига-

ние биогаза в качестве топлива сопровождается выбросами углекислого газа, которые находятся в пределах его естественного природного цикла. Углеродный след отсутствует. Социальные преимущества состоят в создании новых рабочих мест, в первую очередь в сельской местности, улучшении качества окружающей среды и качества жизни.

Процессы анаэробного сбраживания разных органических материалов, а также многоцелевое использование биогаза хорошо изучены, их успешно применяют в мировой, европейской и отечественной практике. Схема анаэробной ферментации (анаэробного ко-разложения) представлена на рис. 1.

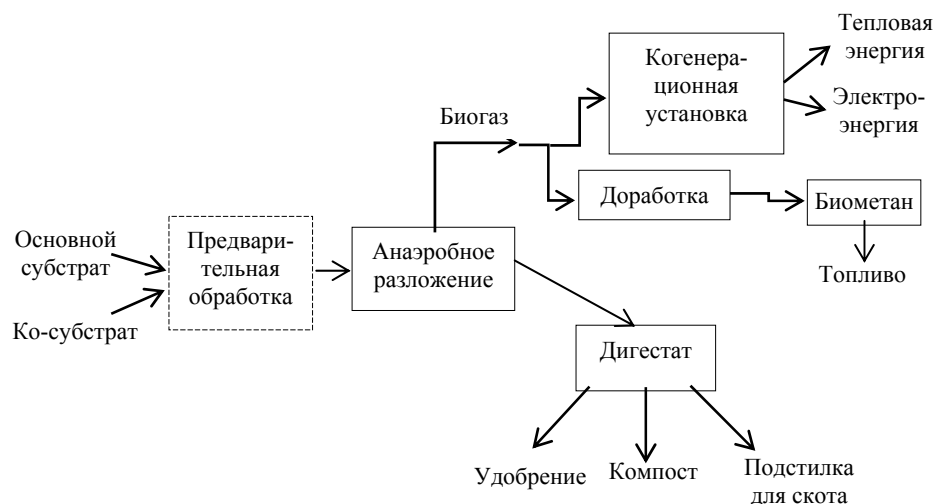


Рис. 1. Схема анаэробного ко-разложения органических материалов

Fig. 1. Scheme of anaerobic co-decomposition of organic materials

Из рис. 1 видно, что в качестве исходных материалов для метанового сбраживания используют главный (основной) субстрат и добавляют ко-субстраты (дополнительные субстраты) с обязательной их предобработкой (измельчение, оптимизация водной фракции, перемешивание, добавление ферментов). Далее следуют поэтапные четыре стадии ферментации (гидролиз, ацидогенез, ацетогенез и метаногенез), в ходе которых в условиях недостатка (или отсутствия) кислорода сложные органические материалы разлагаются на более простые соединения. В результате сложного микробиологического процесса получают два основных продукта – биогаз и органическое удобрение (дигестат – от англ. digestate). Биогаз состоит из метана CH_4 , углекислого газа CO_2 , сероводорода H_2S , аммиака NH_3 , азота N_2 и следов водяного пара в разном процентном содержании. Биогаз – это источник экологически чистой энергии, который можно использовать для производства теплоты, пара, электричества, водорода, а также в качестве транспортного топлива, в том числе для общественного транспорта.

Дополнительный продукт биогазовых технологий – это органическое удобрение (биогумус), которое не содержит патогенных микроорганизмов, семян сорной растительности и неприятного запаха, однако в нем сохраняются питательные макро- и микроэлементы – азот, фосфор, гуминовые

соединения. Его можно использовать (после обезвоживания) в качестве удобрения благодаря оптимальному соотношению в нем биогенных элементов углерода и азота (C/N), высокой гомогенности, доступности питательных веществ. Остатки анаэробного разложения также применяются для компостирования, в качестве подстилки для сельскохозяйственных животных и на другие хозяйственные цели. Таким образом, биогумус имеет добавленную стоимость и производство сертифицированных органических удобрений повышает рентабельность биогазовых технологий.

Широко известен мировой и европейский опыт получения дополнительных ценных биопродуктов из твердых биоотходов, подвергаемых анаэробной ферментации. Эти дополнительные продукты получают посредством объединения процессов анаэробной ферментации с микробной, термической или экстракционной технологиями. Они включают в себя биополимеры, органические кислоты, биотопливо и ферменты, а также биосахар, биомасла, топливные гранулы дигестата, активированные угли, композитные материалы. Республика Беларусь обладает недостаточным опытом производства таких продуктов с добавленной стоимостью. Таким образом, биогазовые технологии представляют собой успешную практику реализации принципов циркулярной экономики.

Развитие биогазовой отрасли в Республике Беларусь

Производство биогаза в Республике Беларусь происходит в рамках энергетического строительства и определяется особенностями экономического развития, а также современными требованиями по декарбонизации хозяйственной деятельности. Необходимым условием эффективного выхода метана является устойчивая, без перерывов, подача органического сырья в емкости для брожения в течение всего времени микробиологического цикла. Это требование должно соблюдаться независимо от сезона года и других (логистических) условий. Логистика, в первую очередь удобные подъездные пути и создание запасов органического сырья, является неотъемлемым условием успешного функционирования биогазовых заводов.

Проведен анализ состояния развития биогазовой отрасли в Республике Беларусь за период с 2018 по 2024 г. с использованием данных Реестров выданных сертификатов о подтверждении происхождения энергии, опубликованных Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, за 2018, 2021, 2023 и 2024 гг. Как следует из данных реестров, в стране биогаз получают влажной и сухой ферментацией. Влажная ферментация происходит с добавлением воды в бродящую биомассу или с использованием субстратов, содержащих значительную водную фракцию (до 90 % и выше по объему). В результате влажной ферментации образуется биогаз. Сухая ферментация происходит без добавления воды в бродящую биомассу или с добавлением минимального ее количества. В результате сухой ферментации формируется тоже биогаз, который имеет дополнительное название – свалочный газ. Содержание влаги в субстратах является критической точкой для выбора используемой технологии.

Результаты анализа данных Реестров выданных сертификатов о подтверждении происхождения энергии представлены в табл. 1.

Таблица 1

Динамика производства энергии с использованием биогазовых установок в Республике Беларусь за период с 2018 по 2024 г.

Dynamics of energy production using biogas plants in the Republic of Belarus for the period from 2018 to 2024

Вид получаемой энергии	2018 г.		2021 г.		2023 г.		2024 г.	
	Количество установок	Мощность, МВт	Количество установок	Мощность, МВт	Количество установок	Мощность, МВт	Количество установок	Мощность, МВт
Биогаз	5	6,275	14	16,597	16	21,219	19	27,582
Свалочный газ	14	20,531	15	21,530	21	31,756	19	27,403
ИТОГО	19	26,806	29	38,127	37	52,984	38	54,958

Как видно из данных табл. 1, по состоянию на июль 2024 г., на территории страны функционируют 38 биогазовых комплексов общей установленной мощностью 54,958 МВт. Следует отметить, что общая мощность установок за пять последних лет увеличилась более, чем в два раза (с 26,806 МВт в 2018 г.). В соответствии с реестрами биогазовые комплексы разделены на две категории.

Первая категория – комплексы, на которых осуществляется влажное анаэробное сбраживание с использованием биореакторов и когенерационных установок. Таких биогазовых комплексов 19. Исходным сырьем для них являются органические отходы, образующиеся в результате производственной деятельности животноводческих комплексов (навоз сельскохозяйственных животных), с добавлением зеленой массы энергетических культур или другого лигноцеллюлозного сырья. Их общая установленная мощность в 2024 г. составила 27,582 МВт.

Примерами использования влажных технологий ферментации 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), ЗАО «Мир Биогаз» Брестской области, Барановичского района (мощность 1,998 МВт), некоторые другие предприятия агропромышленного комплекса.

Вторая категория – комплексы, где используют сухое (или полувлажное) анаэробное сбраживание с эксплуатацией газопоршневых агрегатов (ГПА), или, как их еще называют, установок для дегазации органических отходов. Таких установок 19. Исходным сырьем для них являются твердые коммунальные отходы (ТКО), содержащие органическую фракцию. Они функционируют на специально оборудованных полигонах ТБО. Образующий по такой технологии биогаз называют свалочным газом. Общая установленная мощность таких комплексов составляет 27,403 МВт (в 2024 г.).

Примерами использования технологий сухой (полувлажной) ферментации является производственная деятельность КУПП «Брестский мусороперерабатывающий завод» (г. Брест, мощность 3,192 МВт); СЗАО «Тел-ДаФакс Экотех МН» (Минская обл., полигон ТБО «Тростенецкий») с использованием трех ГПА Jenbacher (общая мощность 2,997 МВт) и двух установок активной дегазации (общая мощность 2,033 МВт); ЗАО «Тел-ДаФакс Экотех-Северный» (Минская обл., Минский р-н, д. Дубовляны) с использованием двух установок (мощность 2,816 МВт).

Проанализирована динамика прироста количества установок, работающих по технологиям влажной и сухой ферментации за 2018–2024 гг. Как показывают полученные данные, динамика существенно различается за анализируемый период. Так, общее количество используемых биогазовых установок увеличилось с 19 до 38, т. е. на 100 %, при этом резко возросли количество эксплуатируемых биореакторов (с 5 до 19) и их мощность (с 6,275 до 27,582 МВт, т. е. более чем в четыре раза). Такие дорогостоящие проекты в 2019–2021 гг. были реализованы с привлечением крупных инвестиций. Это говорит о том, что за указанный период биогазовая отрасль развивалась в основном за счет технологий влажной ферментации с использованием дорогостоящего оборудования – биореакторов и когенерационных установок.

За это же время мощность установок по производству свалочного газа на полигонах ТКО увеличилась с 20,531 до 27,403 МВт к 2024 г., или возросла всего на 33,5 %. Максимальная мощность этих установок отмечена в 2023 г. – 31,756 МВт. При этом количество эксплуатируемых ГПА увеличилось незначительно – с 14 до 19. К настоящему времени количество установок и их мощность в обеих категориях биогазовых заводов приблизительно сравнялись.

Из данных табл. 1 следует, что в настоящее время в биогазовой отрасли страны наступило определенное равновесие по выработке биогаза из отходов животноводства (влажное сбраживание) и из ТБО (сухое или полувлажное сбраживание) – приблизительно по 50 %. Строительство и ввод в строй новых биогазовых комплексов с использованием биореакторов и когенерационных установок остановились. Вероятно, это происходит вследствие двух причин. Первая причина состоит в высоких инвестиционных (капитальных) затратах на оборудование и соответственно больших сроках окупаемости – более 5–6 лет. Второй существенной причиной снижения производства биогаза в стране являются новые экономические условия производства электрической энергии после ввода в строй Белорусской АЭС в 2020 г. Биогазовые комплексы не имеют повышенных тарифов за производство «зеленой» экологически чистой электроэнергии и не могут поставлять ее в общую сеть.

С учетом новых сложившихся экономических условий необходимо переориентировать хозяйственную деятельность крупных биогазовых заводов на производство тепловой энергии для функционирования самих биореакторов (подогрев бродящей массы до оптимальной температуры), обогрева производственных помещений, жилого сектора, теплиц и других мощностей. Перспективным направлением является производство серпи-

фицированного органического удобрения из отработанного органического остатка. Актуальной экологической функцией остается снижение загрязнения близлежащих к животноводческим комплексам территорий, поверхностных и подземных вод органическими веществами и нитратами. Переориентация производственной деятельности должна быть организована в соответствии с отдельными проектами по каждому биогазовому комплексу с учетом новых условий, логистических связей и других факторов.

Развитие производства свалочного газа за анализируемый период проходило стабильно, с положительной динамикой. Это связано с высокой доступностью дешевого исходного сырья, большими объемами образования ТБО, низкими капитальными затратами на оборудование (газопоршневые агрегаты и установки по дегазации органических отходов), достаточно изученными и апробированными технологиями, позволяющими гарантированно получать необходимые объемы свалочного газа, и возможностью его использования на конкретные местные (локальные) нужды ЖКХ. По нашему мнению, сложившаяся в настоящее время ситуация в энергетическом секторе приведет в ближайшей перспективе к быстрому нарастанию производства свалочного газа из ТБО.

Ко-ферментация как основной технологический процесс производства биогаза и свалочного газа

Главным определяющим экономическим условием производства биогаза является наличие дешевого и легкодоступного органического сырья, экологическим условием – потребность в эффективном управлении отходами.

Успешное применение биогазовых технологий основано на выполнении регламента микробиологического процесса, где определяющим фактором является состав входящих сырьевых потоков. Оптимальная рецептура входящих потоков повышает эффективность выхода метана на 30 % и выше, иногда на 400 % [6]. Состав входящего органического сырья является фактором, определяющим эффективность (или полную неэффективность, т. е. остановку) метанового брожения.

Биогаз и свалочный газ в Республике Беларусь получают из широкого спектра органических материалов. Кроме навоза сельскохозяйственных животных и другой вторичной биомассы используют муниципальные твердые отходы, органические отходы молочной, спиртовой и других видов пищевой промышленности, сельскохозяйственную биомассу, пожнивные остатки лигноцеллюлозного сырья (стебли, листья, корни, семена, оболочки семян), энергетические культуры, органические отходы жилищно-коммунального хозяйства, пунктов общественного питания.

Органические субстраты обладают разными свойствами, в первую очередь по технологическим характеристикам – содержанию водной фракции и доступности к микробиологическому разложению. Твердые, со сложной структурой материалы (древесина и солома, т. е. лигноцеллюлозный материал) лучше подходят для аэробных условий разложения, то есть компостирования. Текущие, жидкие материалы (навоз, отходы продуктов пита-

ния, осадки сточных вод) лучше разлагаются в анаэробных условиях, то есть в процессе брожения. При этом влажность сырья является решающим фактором, каким методом (брожение или компостирование) их лучше всего перерабатывать. Основные закономерности этих процессов представлены на рис. 2.



Рис. 2. Аэробная и анаэробная переработка органических отходов
Fig. 2. Aerobic and anaerobic digestion of organic waste

Как следует из рис. 2, существует сложность анаэробного разложения древесного и лигнин-целлюлозного растительного сырья вследствие низкого содержания в нем влажной фракции и наличия длинных целлюлозных цепочек, которые «запечатаны» в нерастворимую субстанцию – лигнин. На схеме есть указания на эффективное разложение полувлажной биомассы в условиях аэробного разложения (компостирования). Если для брожения использовать, например, исключительно пожнивные остатки, то микробиологический процесс протекает нестабильно, с увеличением скорости выхода метана и затуханием, что приводит к неравномерному образованию биогаза и возможной остановке процесса. При этом, как положительный момент, сухая ферментация требует меньших энергетических и материальных затрат – на транспортировку органической массы с высоким содержанием воды и нагрев жидкой фракции. Этот метод рассчитан на сыпучие материалы с содержанием сухого вещества свыше 25 %. Содержание сухого вещества в субстрате от 40 до 60 % делает его пригодным только к компостированию.

Поскольку затраты на преобразование лигноцеллюлозного сырья в биоэнергетику превышают цену ископаемого топлива, разработка экономически жизнеспособных производственных систем требует использования малоценных видов биомассы и отходов, которые в настоящее время используются недостаточно, в том числе и в нашей стране.

Рассмотрим некоторые преимущества (особенности) использования органических отходов (малоценной биомассы) для производства биогаза для условий республики.

1. Органические отходы не затрагивают потребление первичных природных ресурсов, но при этом значительно уменьшают экономические риски, снижая конкуренцию между энергетическим сектором и производством продуктов питания.

2. Широкий спектр доступных органических материалов создает благоприятные условия для производства биогаза.

При использовании одного субстрата (чаще всего это основной по логистике субстрат) микробиологические процессы идут либо быстро, либо медленно, с затуханием, зачастую с полной остановкой метаногенеза. Любой моносубстрат не имеет оптимального соотношения биогенных элементов для эффективного прохождения стадий метаногенеза. Например, соотношение содержания углерода к азоту (C/N) около 200/1 и выше (у соломы) делает процесс анаэробного разложения невозможным, поскольку оптимальное соотношение должно составлять 20/1.

Технологическими недостатками обладают и другие отдельные субстраты. Например, навоз сельскохозяйственных животных имеет низкое содержание органической фракции при высоком содержании азота, тогда как отходы растениеводства (включая пожнивные остатки и солому) содержат мало азота и являются трудноразлагаемыми материалами вследствие высокого содержания в них сырых целлюлозных цепочек и лигнина.

Особо следует отметить особенности лигнина с точки зрения его доступности для микробиологического разложения. Лигнин представляет собой одеревенелый материал растений, который находится в межклеточном пространстве растительной ткани. Это гетеро-полисахарид со сложной разветвленной структурой, который тяжело разлагается консорциумом микроорганизмов и кислотами. Его относят к группе трудноразлагаемых углеводов вместе с гемицеллюлозой, суберином, кутином и другими углеводами. Достаточно часто моносубстрат лигнина относят к неразлагаемым материалам.

Поэтому на биогазовых заводах Республики Беларусь используют прием смешивания нескольких субстратов с целью повышения эффективности процессов метаногенеза. Разнообразный состав органических материалов вполне гарантирует создание успешной рецептуры с устойчивым выходом биогаза.

3. В естественных природных условиях происходит одновременное сбраживание многих субстратов, известное под названием ко-сбраживания (от англ. – co-digestion). Этот процесс уменьшает и/или исключает недостатки моносбраживания, значительно увеличивая скорость био-конверсии и повышая эффективность выхода метана.

Многокомпонентный субстрат называют ко-субстратом, ферментация нескольких субстратов носит название ко-ферментации. Поскольку органические материалы обладают разным содержанием твердой фракции, дефицитом или избытком питательных соединений, потенциально высокой концентрацией токсических соединений, низким содержанием витаминов и минералов и другими лимитирующими свойствами, ко-субстрат позволяет оптимизировать состав бродящей биомассы, сделать ее более доступной для микробиологического разложения, обеспечить стабильный и гарантированный выход метана.

Прием использования ко-субстратов из исходных доступных материалов позволяет существенно повысить экономическую эффективность работы биогазовых установок, без высоких инвестиционных затрат.

4. Использование ко-субстратов создает достаточную буферную емкость (объем) брожения, что обеспечивает оптимальную скорость загрузки емкостей и равномерное перемешивание бродящей массы. Более полное использование рабочего объема реакторов снижает накопление токсинов/ингибиторов в системе и обогащает сырье макро- и микроэлементами, необходимыми для размножения микроорганизмов. Добавление правильно подобранного ко-субстрата оптимизирует скорость загрузки органических веществ и создание сбалансированной питательной композиции [7].

Буферная емкость способствует высокому микробному разнообразию и формированию высокоэффективного микробного консорциума. Эти условия улучшают стабильность анаэробного сбраживания и увеличивает выход биогаза/метана благодаря синергетическому воздействию микроорганизмов. Процессы сопровождаются уменьшением количества ингибирующих соединений (общий азот аммиака, фенольные кислоты и фуран) в результате эффекта разбавления бродящей биомассы [8, 9].

Неравномерная загрузка биогазового оборудования (в основном биореакторов) вследствие отсутствия или нехватки органического сырья является одним из существенных недостатков современных биогазовых технологий, которые снижают эффективность получения биогаза в условиях Республики Беларусь.

5. Анаэробное сбраживание органической биомассы является эффективной технологией по обращению с отходами, поскольку в процессе метаногенеза происходят значительное сокращение их объемов и изменение состава. Известно, что в европейских странах начальная разработка и внедрение биогазовых технологий были напрямую связаны с выполнением экологического требования – сократить объемы коммунальных шламов, отправляемых на захоронение или складирование. Например, первоначально в Швеции биогаз начали производить с 60-х гг. XX ст. из осадков, образующихся на муниципальных очистных сооружениях крупных городов. Такой подход обеспечил минимизацию поступления органических загрязнителей в водную среду и улучшение качества поверхностных вод.

Нефтяной кризис, который разразился в 70-е гг. XX ст., дал новый качественный скачок для развития биогазовых технологий в Европе с целью устойчивого замещения части используемого ископаемого топлива. Таким образом, энергетическая функция производства биогаза оформилась несколько позже.

6. Использование ко-субстратов значительно улучшает качество дигестата путем разбавления композиции сырья и, таким образом, снижает содержание тяжелых металлов, ксенобиотических соединений, патогенов, генов устойчивости к антибиотикам и устойчивых к антибиотикам бактерий в бродящей среде [10]. Это полезно, поскольку делает дигестат безопасным и более полезным для непосредственного использования в сельском хозяйстве, образуя возобновляемое удобрение высокой агрономической ценности без связанных с этим проблем фитотоксичности. Его можно также применять в качестве добавки к обработанной почве в форме обогащенного макронутриентами биосахара или в качестве продукта компости-

рования/совместного компостирования твердой фракции ко-дигестата. Благоприятное воздействие на окружающую среду связано с повышенной биодоступностью питательных веществ при использовании ко-дигестата для компостирования, вермикомпостирования, культивирования грибов и других полезных организмов, включая организмы по биологической защите растений [11, 12].

Основные преимущества и недостатки ко-ферментации и моноферментации представлены в табл. 2.

Таким образом, технологии ко-сбраживания позволяют моделировать состав используемых органических отходов посредством приготовления ко-субстратов с учетом входящих материалов. Ко-сбраживание регулирует скорость микробиологического процесса, обеспечивает равномерную загрузку оборудования в течение года. При этом сложноразлагаемый лигнин-целлюлозный материал можно заменять на легкоразлагаемые отходы пищевой промышленности, которые являются более энергонасыщенными. Например, значительным потенциалом для выхода биогаза обладают отходы от производства рапсового масла – 660 м³ на тонну отходов рапсового жмыха, в то время как силос кукурузы и солома зерновых культур формируют соответственно только 200 и 190 м³ биогаза на тонну отходов [14].

Таблица 2

Сравнительная характеристика показателей ко-ферментации и моноферментации

Comparative characteristics of co-fermentation and monofermentation indicators

Ко-ферментация	Моноферментация
Сбалансированный состав исходного сырья: оптимальное соотношение C/N, содержание твердой фракции, высокая буферная способность	Несбалансированный состав исходного сырья: неоптимальное соотношение C/N, дефицит твердой фракции, низкая буферная способность
Уменьшение концентраций (разведение) токсикантов, патогенных микроорганизмов, резистентных к антибиотикам бактерий и генов	Наличие тяжелых металлов, ксенобиотиков, резистентных к антибиотикам бактерий
Технологические возможности повысить скорость разложения органических субстратов	Необходимость снижения высокого содержания органических субстратов
Высокое разнообразие микробного консорциума	Низкое разнообразие микробного консорциума
Синергический эффект функционирования микроорганизмов	Отсутствие синергического эффекта функционирования микроорганизмов
Стабильность протекания микробиологического процесса	Возможная остановка микробиологического процесса
Гарантированный высокий выход биогаза/метана	Низкий выход биогаза/метана
Улучшенное качество дигестата, с высоким содержанием питательных элементов, доступных для питания растений	Нет
Экономические выгоды	Нет

На повышение эффективности выхода биогаза оказывает влияние возможность использования не только отходов животноводства, но и продуктов, имеющих более высокое содержание органических веществ. Вышеуказанные субстраты могут увеличить выход биогаза для условий Респуб-

лики Беларусь. Учитывая то, что площади возделывания озимого рапса, кукурузы и зерновых культур стабильны и имеют тенденцию к расширению, можно сказать, что вышеуказанные ресурсы могут способствовать повышению производства биогаза в стране.

Таким образом, использование ко-субстратов обеспечивает технологические, экономические и экологические преимущества, поскольку выход метана в этих условиях стабильный и гарантированный. Причем состав используемых субстратов может быть чрезвычайно разнообразным, без принципиальных ограничений. Такой подход в использовании биогазовых технологий дает новый качественный толчок к быстрому их развитию во всех странах, позволяя уменьшать объемы складирования органических отходов.

Следует отметить, что органическая фракция ТКО, хотя и является весьма ценной для использования в биогазовых технологиях, представляет из себя достаточно специфический материал. В первую очередь, это наличие в ней мелкодисперсной минеральной фракции (песка и камней), высокое содержание твердых веществ, большой размер частиц, дефицит или избыток питательных веществ, низкий или чрезвычайно высокий показатель рН, повышенное содержание ионов тяжелых металлов и токсических соединений. Это создает трудности для формирования и функционирования синтрофического микробного сообщества и метаногенов [15] для эффективного разложения биомассы. В частности, необходимо увеличивать период гидролиза для повышения скорости выхода метана из субстрата.

Учитывая изложенное, следует отметить высокую ценность органических отходов, получаемых из различных источников, включая ТБО, отходы пищевой промышленности и вторичную биомассу.

Как показывает опыт производства биогаза и свалочного газа в Республике Беларусь, в ближайшее время будет интенсивно развиваться производство свалочного газа из органической фракции ТБО.

ВЫВОДЫ

1. Республика Беларусь обладает высоким потенциалом производства биогаза и свалочного газа. Поскольку затраты на преобразование лигноцеллюлозного сырья в биоэнергетику превышают цену ископаемого топлива, разработка экономически жизнеспособных производственных систем требует использования малоценных видов биомассы и отходов, которые используются недостаточно.

2. В настоящее время сложились специфические условия для функционирования «зеленой» энергетики. Целесообразно частично переориентировать хозяйственную деятельность крупных биогазовых заводов на производство тепловой энергии, получение органического удобрения и других ценных продуктов с добавленной стоимостью. Низкие затраты и широкий диапазон исходного сырья увеличивают потенциальные возможности биогаза как источника экологически чистой энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. О Государственной программе «Энергосбережение» на 2021–2025 годы: постановление Совета Министров Республики Беларусь от 24 февраля 2021 г. № 103 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100103>.

2. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период 2030 года. Минск, 2017. URL: <https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR2030/Natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitija-Respubliki-Belarus-na-period-do-2030-goda.pdf>.
 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. 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. тр. 15-й Междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. Минск: БНТУ, 2019. Т. 2. С. 104–110.
 5. Реестр выданных сертификатов о подтверждении происхождения энергии на 31.07.2023: утв. Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. Минск: Государственный кадастр возобновляемых источников энергии Минприроды Республики Беларусь, 2023. 81 с.
 6. Anaerobic Co-Digestion Process for Biogas Production: Progress, Challenges and Perspectives / K. Hagos, J. Zong, D. Li, X. Lu // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 76. P. 1485–1496. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184>.
 7. Anaerobic Co-Digestion of Sewage Sludge with Other Organic Wastes: A Comprehensive Review Focusing on Selection Criteria, Operational Conditions, and Microbiology / R. Azarmanesh, M. Zarghami Qaretafeh, M. Hasani Zonoozi [et al.] // Chemical Engineering Journal Advances. 2023. Vol. 14. Art. 100453. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.100453>.
 8. Anaerobic Co-Digestion of Animal Manures with Corn Stover or Apple Pulp for Enhanced Biogas Production / K. Li, R. Liu, S. Cui [et al.] // Renewable Energy. 2018. Vol. 118. P. 335–342. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.023>.
 9. Methane and Hydrogen Production from Anaerobic Digestion of Soluble Fraction Obtained by Sugarcane Bagasse Ozonation / O. F. H. Adarme, B. E. L. Baêta, D. R. S. Lima [et al.] // Industrial Crops and Products. 2017. Vol. 109. P. 288–299.
 10. Biomass in Biogas Production: Pretreatment and Codigestion / A. Kasinath, S. Fudala-Ksiazek, M. Szopinska [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 150. Art. 111509. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111509>.
 11. Integrating Anaerobic Co-Digestion of Dairy Manure and Food Waste with Cultivation of Edible Mushrooms for Nutrient Recovery / B. J. O'Brien, E. Milligan, J. Carver [et al.] // Bioresource Technology. 2019. Vol. 285. Art. 121312. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121312>.
 12. Rethinking Organic Wastes Bioconversion: Evaluating the Potential of the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF) / K. C. Surendra, J. K. Tomberlin, A. van Huis [et al.] // Waste Management. 2020. Vol. 117. P. 58–80. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.050>.
 13. A Comparative Study of Thermophilic and Mesophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Wheat Straw: Process Stability and Microbial Community Structure Shifts / X. Shi, X. Guo, W. Zuo [et al.] // Waste Manage. 2018. Vol. 75. P. 261–269. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.004>.
 14. Обоснование использования биогаза для производства энергии в Республике Беларусь / Е. В. Зеленухо [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>.
 15. Microbial ElectroHydrogenesis Cell and Dark Fermentation Integrated System Enhances Biohydrogen Production from Lignocellulosic Agricultural Wastes: Substrate Pretreatment towards Optimization / F. Ndayisenga, Z. Yu, J. Zheng // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 145. Art. 111078. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111078>.
- Поступила 12.05.2025 Подписана в печать 15.07.2025 Опубликована онлайн 30.09.2025

REFERENCES

1. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus Dated February 24, 2021 No.103 “About the State Program “Energy Saving” for 2021–2025”. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100103> (in Russian).

2. *National Strategy for Sustainable Socioeconomic Development of the Republic of Belarus for the Period 2030*. Minsk, 2017. Available at: https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR_2030/Natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiya-Respubliki-Belarus-na-period-do-2030-goda.pdf (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. Zelianukha E. V., Belskaya G. V., Rolevich I. V. (2019) Key Areas for Improving the Efficiency of Biogas Production. *Socio-Economic and Environmental Problems of Mining, Construction and Energy: Collection of Scientific Works of the 15th International Conference on Mining, Construction and Energy. Vol. 2*. Minsk, Belarusian National Technical University, 104–110 (in Russian).
5. *Register of Issued Certificates of Confirmation of the Origin of Energy as of 31.07.2023: Approved by the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus*. Minsk, State Cadastre of Renewable Energy Sources of the Ministry of Natural Resources of the Republic of Belarus, 2023. 81 (in Russian).
6. Hagos K., Zong J., Li D., Liu C., Lu X. (2017) Anaerobic Co-Digestion Process for Biogas Production: Progress, Challenges and Perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 1485–1496. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184>.
7. Azarmanesh R., Zarghami Qaretafeh M., Hasani Zonoozi M., Ghiasinejad H., Zhang Y. (2023) Anaerobic Co-Digestion of Sewage Sludge with Other Organic Wastes: A Comprehensive Review Focusing on Selection Criteria, Operational Conditions, and Microbiology. *Chemical Engineering Journal Advances*, 14, 100453. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.100453>.
8. Li K., Liu R., Cui S., Yu Q., Ma R. (2018) Anaerobic Co-Digestion of Animal Manures with Corn Stover or Apple Pulp for Enhanced Biogas Production. *Renewable Energy*, 118, 335–342. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.023>.
9. Adarme O. F. H., Baeta B. E. L., Lima D. R. S., Gurgel L. V. A., de Aquino S. F. (2017) Methane and Hydrogen Production from Anaerobic Digestion of Soluble Fraction Obtained by Sugarcane Bagasse Ozonation. *Industrial Crops and Products*, 109, 288–299. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.08.040>.
10. Kasinath A., Fudala-Ksiazek S., Szopinska M., Bylinski H., Artichowicz W., Remiszewska-Skwarek A., Luczkiewicz A. (2021) Biomass in Biogas Production: Pretreatment and Codigestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111509. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111509>.
11. O'Brien B. J., Milligan E., Carver J., Roy E. D. (2019). Integrating Anaerobic Co-Digestion of Dairy Manure and Food Waste with Cultivation of Edible Mushrooms for Nutrient Recovery. *Bioresour. Technol.*, 285, 121312. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121312>.
12. Surendra K. C., Tomberlin J. K., van Huis A., Cammack J. A., Heckmann L.-H. L., Khanal S. K. (2020). Rethinking Organic Wastes Bioconversion: Evaluating the Potential of the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF). *Waste Management*, 117, 58–80. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.050>.
13. Shi X., Guo X., Zuo J., Wang Y., Zhang M. (2018) A Comparative Study of Thermophilic and Mesophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and wheat Straw: Process Stability and Microbial Community Structure Shifts. *Waste Management*, 75, 261–269. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.004>.
14. 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. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (6), 530–543. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-530-543>.
15. Ndayisenga F., Yu Z., Zheng J., Wang B., Liang H., Phulpoto I. A., Habiyaakare T., Zhou D. (2021) Microbial Electrohydrogenesis Cell And Dark Fermentation Integrated System Enhances Biohydrogen Production from Lignocellulosic Agricultural Wastes: Substrate Pretreatment Towards Optimization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111078. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111078>.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-457-476>

УДК 66.047.7

Исследования конвективной сушки тонких и толстых влажных материалов

А. И. Ольшанский¹⁾, А. Н. Голубев¹⁾

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

Реферат. Рассмотрены закономерности сушки тонких и толстых образцов керамики и пластин глины, установлены значения теплообменного числа Био, а также характер изменения температурного коэффициента сушки для его различных величин. Анализ эксперимента по сушке тонких и толстых материалов показал, что одного числа Био недостаточно для такого деления, поскольку величина числа Био зависит от многих факторов – режима сушки, коэффициента теплоотдачи, вида влажного тела и его коэффициента теплопроводности сухого тела. Самое значительное влияние на величину числа Био оказывает сложная форма зависимости коэффициента теплопроводности влажного тела от влагосодержания и температуры. На основе изучения и анализа многих источников установлены формулы для определения коэффициентов теплопроводности влажных тел. Для комплексной оценки возможного деления материалов на тонкие и толстые изучено влияние группы критериев подобия тепло- и массообмена на температурный коэффициент сушки. Предложен возможный метод деления материалов совместно по величине тепло- и массообменных чисел Био и критерию Лыкова на четыре группы. Установлены пределы изменения критерия Лыкова в зависимости от величины чисел Био. Представлены расчеты средней температуры в процессе сушки тонких и толстых образцов керамики и пластин глины по формулам и дано сопоставление значений с опытными данными.

Ключевые слова: температурный коэффициент сушки, сушка тонких и толстых материалов, скорость сушки, коэффициент теплоотдачи, коэффициент теплопроводности влажного тела, влагосодержание

Для цитирования: Ольшанский, А. И. Исследования конвективной сушки тонких и толстых влажных материалов / А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 5. С. 457–476. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-457-476>

Investigations of Convective Drying of Thin and Thick Wet Materials

A. I. Ol'shanskii¹⁾, A. N. Golubev¹⁾

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

Abstract. The regularities of drying thin and thick ceramic samples and clay plates are considered, the values of the Biot heat exchange number in the process of drying ceramics and clay

Адрес для переписки

Голубев Алексей Николаевич
Витебский государственный технологический университет
просп. Московский, 72,
220035, г. Витебск, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 112 79 25
tm@vstu.by

Address for correspondence

Golubev Aleksei N.
Vitebsk State Technological University
72, Moskovsky Ave.,
220035, Vitebsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 112 79 25
tm@vstu.by

plates of different thicknesses are established, as well as the nature of the change in the drying temperature coefficient for its various values. An analysis of the experiment on drying of thin and thick materials showed that such division based on one Biot number is insufficient, since the Biot value depends on many factors – the drying mode, the heat transfer coefficient, the type of wet body and its coefficient of thermal conductivity of a dry body. The most significant influence on the Biot value is exerted by the complex form of the dependence of the coefficient of thermal conductivity of a wet body on moisture content and temperature. Based on the study and analysis of many sources, formulas have been established for determining the coefficients of thermal conductivity of wet bodies. For a comprehensive assessment of the possible division of materials into thin and thick, the influence of a group of heat and mass transfer similarity criteria on the temperature coefficient of drying was studied. A possible method for dividing materials into four groups based on the value of heat and mass exchange Biot numbers and the Lykov criterion is proposed. The limits of change in the Lykov criterion are established depending on the value of the Biot numbers. Calculations of the average temperature during drying of thin and thick ceramic samples and clay plates are presented using formulas and a comparison of the values with experimental data is given.

Keywords: drying temperature coefficient, drying of thin and thick materials, drying speed, heat transfer coefficient, thermal conductivity coefficient of a wet body, moisture content

For citation: Ol'shanskii A. I., Golubev A. N. (2025) Investigations of Convective Drying of Thin and Thick Wet Materials. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (5), 457–476. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-457-476> (in Russian)

Введение

Сушка влажных материалов – сложный теплофизический процесс, в котором изменяются структурно-механические и технологические свойства влажных тел.

Закономерности сушки тонких и толстых плоских материалов значительно различаются как механизмом переноса теплоты и влаги внутри тела, так и характером взаимодействия поверхности испарения материала с окружающей средой [1, 2]. Сушимые тонкие материалы с большой удельной поверхностью имеют малые перепады влагосодержаний и температур по сечению тела. Для таких тонких материалов тепломассообменные числа Био (Bi , Bi_m) в реальных условиях сушки зависят друг от друга и их численные значения имеют приблизительно один порядок [3, 4–6]. При малых значениях Био главным лимитирующим фактором является внешний теплоперенос с поверхности материала при взаимодействии с окружающей средой (внешняя задача) [3–5]. В условиях внешней задачи при незначительных градиентах влагосодержаний и температур скорость сушки практически не зависит от внутреннего массопереноса [4–6] и термодиффузионное сопротивление (термодиффузия) не влияет на условия кинетики сушки (критерий Поснова $Pn \rightarrow 0$). Испарение влаги происходит только с поверхности материала [3–5].

Характер сушки толстых материалов отличается от характера сушки тонких, сушка которых протекает по схеме «мягкого» режима с периодами ее постоянных скорости и температуры на уровне температуры мокрого термометра $t_{м.т}$ [4, 5, 7, 8]. С увеличением толщины материала при сушке

внутри тела возникают значительные температурные градиенты и перепады влагосодержаний, разность температур $t_n - t_c$ возрастает и значительную роль начинает играть термодиффузия, препятствующая переносу влаги от центра тела к поверхности [2, 4, 5]. Происходит углубление зоны испарения, и влага испаряется не только с поверхности, но и внутри тела [1, 4, 9]. При этом сушка толстых материалов происходит по схеме жесткого режима без периода постоянной температуры [2]. Температура возрастает сразу от начальной $t_n \approx 20$ °С до конечной, заданной режимом сушки.

А. В. Лыковым было предложено проводить деление материалов в процессе сушки на тонкие и толстые по величине теплообменного критерия $Bi = \alpha\delta/\lambda_w$, где за характерный размер влажного тела принимать толщину материала δ . Для тонких материалов число $Bi < 1$, для толстых $Bi > 1$. Однако необходимо отметить, что в аналитических решениях уравнения теплопроводности в граничных условиях за характерный размер принимается по условиям симметрии половина толщины пластины $R = \delta/2$ [1, 3, 10], а также то, что на величину числа Bi влияет интенсивность теплообмена на границе тела с окружающей средой, определяемая коэффициентом теплоотдачи $\bar{\alpha}$ [1, 4, 10]. И, наконец, самое большое влияние на величину числа Bi оказывает коэффициент теплопроводности влажного материала $\lambda_{вл}$, который находится в очень сложной форме зависимости от влагосодержания, температуры и вида материала, его коэффициента теплопроводности сухого тела λ_0 [10–16].

В [8] предложено проводить деление на тонкие и толстые материалы с учетом перепада температур $\Delta t = t_n - t_c$ по сечению влажного тела. Для толстых материалов Δt увеличивается с ростом толщины материала. Однако величина числа Bi зависит не только от коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}$, но и существенно от коэффициента теплопроводности влажного тела $\lambda_{вл}$. Коэффициент $\lambda_{вл}$ зависит не только от температуры и влагосодержания тела, но и от его физических свойств. Например, при коэффициенте теплопроводности сухой войлочной пластины $\lambda_0 \approx 0,052$ Вт/м °С с толщиной $\delta \approx 10$ мм ($Bi = 0,65-0,8$) при режиме сушки $t_c = 120$ °С, $v = 3$ м/с перепад температур $\Delta t = t_n - t_c$ составлял на протяжении всего процесса $\Delta t = 30-35$ °С. Таким образом, величина числа Bi зависит и от теплофизических характеристик материала и, следовательно, от критерия Лыкова $Lu = a_m/a$, где a_m – коэффициент диффузии влаги; a – то же диффузии теплоты; $a_m = \lambda_m/c_m\rho$; $a = \lambda_{вл}/c_{вл}\rho$; λ_m – коэффициент теплопроводности; c_m – то же массоемкости; $c_{вл}$ – удельная теплоемкость влажного тела.

Эксперимент

На рис. 1а и 2а даны температурные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ для процессов сушки тонких и толстых образцов керамики и пластин глины при $t_c = 120^\circ\text{C}$, скорости воздуха $v = 5$ м/с.

На рис. 1а даны кривые I и II для процессов сушки керамических плиток толщиной $\delta = 5, 10$ мм и $\delta = 20, 30$ и 50 мм соответственно, на рис. 2а – кривые I и II для процессов сушки пластин глины толщиной $\delta = 10, 12, 15$ мм и $\delta = 20, 30$ и 50 мм соответственно.

Эксперимент по конвективной сушке тонких и толстых образцов керамики и глины показал различный характер изменения среднеинтегральных температур. Видно, что в отличие от сушки тонких образцов при сушке толстых не наблюдается постоянной температуры на уровне $t_{\text{м.т.}}$. Температура сразу возрастает с начала процесса от начальной $t_n = 20^\circ\text{C}$.

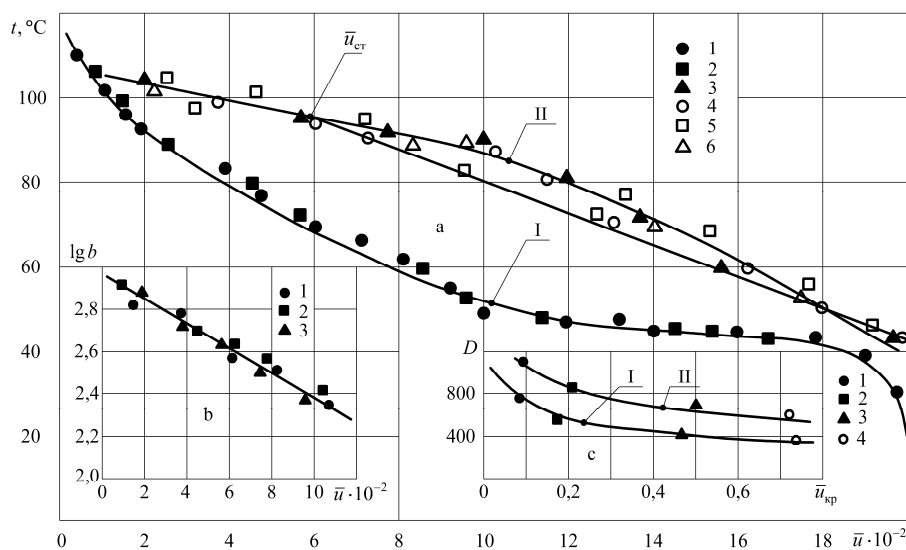


Рис. 1. Температурные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ для процессов конвективной сушки тонкой керамической плитки (I), толстой плитки (II) при: $t_c = 120^\circ\text{C}$; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5\%$; 1 – 5 мм; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30; 5 – 50 мм (а);

зависимость температурного коэффициента сушки $\lg b$ от влагосодержания $\bar{u}$ для керамической плитки при: 1 – $t_c = 90^\circ\text{C}$; 2 – 120°C ; 3 – 150°C , $v = 3; 5; 10$ м/с (b);

зависимость коэффициента D от критического влагосодержания $\bar{u}_{\text{кр}}$ при сушке:

1 – керамической плитки, 2 – асбеста, 3 – картона, 4 – войлока; I – $t_c = 90^\circ\text{C}$; II – 120°C (c)

Fig. 1. Temperature curves $\bar{t} = f(\bar{u})$ in the process of convective drying of thin ceramic tiles (I), thick tiles (II) for the drying mode: $t_c = 120^\circ\text{C}$, $v = 5$ м/с; $\varphi = 5\%$; 1 – 5 мм; 2 – 10 мм; 3 – 20 мм; 4 – 30 мм; 5 – 50 мм (a); dependence of the drying temperature coefficient $\lg b$ on the moisture content $\bar{u}$ in the process of drying ceramic tiles under drying modes: 1 – $t_c = 90^\circ\text{C}$, 2 – $t_c = 120^\circ\text{C}$, 3 – $t_c = 150^\circ\text{C}$, $v = 3; 5$ and 10 м/с (b); dependence of the coefficient D on the critical moisture content $\bar{u}_{\text{кр}}$ in formula (10) during drying: 1 – ceramic tiles, 2 – asbestos, 3 – cardboard, 4 – felt; I – $t_c = 90^\circ\text{C}$; II – $t_c = 120^\circ\text{C}$ (c)

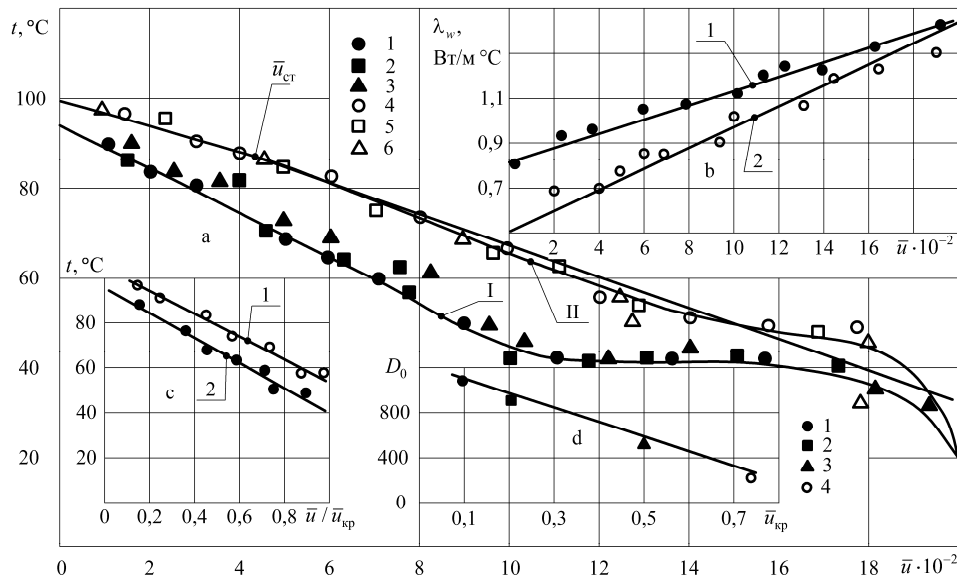


Рис. 2. Температурные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ для конвективной сушки тонких (I) и толстых пластин (II) глины при: $t_c = 120^\circ\text{C}$; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5\%$; 1 – 5 мм; 2 – 12; 3 – 15; 4 – 20; 5 – 30; 6 – 50 мм (а); зависимость коэффициента теплопроводности λ_w влажной керамики и красных глин от влагосодержания $\bar{u}$:

1 – керамика, 2 – красные глины (b); зависимость средней температуры $\bar{t}$ от относительного влагосодержания $\bar{u} / \bar{u}_{\text{кр}}$ для процессов сушки тонкой керамической плитки (1) и тонких пластин глин (2) для режима сушки $t_c = 120^\circ\text{C}$, $v = 5$ м/с (c); зависимость коэффициента D_0 от критического влагосодержания $\bar{u}_{\text{кр}}$ для сушки: 1 – керамики, 2 – асбеста, 3 – картона, 4 – войлока (d)

Fig. 2. Temperature curves $\bar{t} = f(\bar{u})$ during convective drying of thin clay plates (I) and thick plates (II) of clay at: $t_c = 120^\circ\text{C}$, $v = 5$ m/s; $\varphi = 5\%$, 1 – 5 mm, 2 – 12 mm, 3 – 15 mm, 4 – 20 mm, 5 – 30 mm, 6 – 50 mm (a); dependence of the thermal conductivity coefficient λ_w of wet ceramics and red clays on the moisture content $\bar{u}$:

1 – ceramics, 2 – red clays (b); dependence of the average temperature $\bar{t}$ on the relative moisture content $\bar{u} / \bar{u}_{\text{кр}}$ for the drying processes of thin ceramic tiles (1) and thin clay plates (2) for the drying mode: $t_c = 120^\circ\text{C}$, $v = 5$ m/s (c); dependence of the coefficient D_0 on the critical moisture content $\bar{u}_{\text{кр}}$ in formula (9) for drying: 1 – ceramics, 2 – asbestos, 3 – cardboard, 4 – felt (d)

Различный характер температурных кривых при сушке тонких и толстых образцов материала вызывает существенное различие в температурном коэффициенте сушки $b = d\bar{t} / d\bar{u}$, который определяется графическим дифференцированием кривых $\bar{t} = f(\bar{u})$ [2, 17]. При сушке тонких материалов на температурных кривых $\bar{t} = f(\bar{u})$ наблюдаются периоды постоянной скорости сушки и постоянной температуры $t_{\text{м.т.}}$. При сушке толстых образцов керамики и глины зависимость между $\bar{t}$ и $\bar{u}$ можно представить

приближенно двумя прямыми, сопряженными в точке перехода от первой зоны ко второй при влагосодержании стыковки зон $\bar{u}_{\text{ст}}$. Для линейных зон температурный коэффициент сушки b – величина постоянная ($b = d\bar{t} / d\bar{u} = \text{const}$).

Таким образом, необходимо выяснить наиболее общие признаки возможного деления материалов на тонкие и толстые при сушке, поскольку по величине только критерия Био такое деление невозможно. Необходимо выяснить, каким образом изменяется число Bi при изменении толщины материала.

Число Био вычислим по формуле:

$$Bi = \frac{\bar{\alpha}R}{\lambda_w}, \quad \frac{\bar{\alpha}\delta}{\lambda_w}.$$

За характерный определяющий размер влажного тела принимается толщина материала $\delta = 2R$, где R – половина толщины.

Коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$ при взаимодействии поверхности материала с окружающей средой t_c зависит от режима сушки. С увеличением температуры теплоносителя t_c и скорости его движения v коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$ возрастает.

Коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$ определяется по формуле для критерия Нуссельта

$$Nu = A \cdot Re^{0,5} \left(\frac{T_c}{T_{\text{м.т}}} \right)^2 \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right)^n, \quad (1)$$

где $Nu = \frac{\bar{\alpha}l}{\lambda_{\text{воз}}}$ – число Нуссельта; $Re = \frac{vl}{\nu_{\text{воз}}}$ – число Рейнольдса; T_c , $T_{\text{м.т}}$ – абсолютные температуры среды и мокрого термометра; отношение $\left(\bar{u} / \bar{u}_{\text{кр}} \right)^n$ учитывает уменьшение $\bar{\alpha}$ в периоде падающей скорости сушки; l – длина образца материала по набеганию потока воздуха; $\lambda_{\text{воз}}$, $\nu_{\text{воз}}$ – коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости воздуха по таблицам.

Коэффициент n в уравнении (1) определяется экспериментально [1, 18–21]. Для процесса сушки керамики [1] $n = 0,73$, глины $n = 0,9$. Коэффициент $A = 0,75$ – для керамики, $A = 0,35$ – для глины. Коэффициент теплоотдачи вычисляется по соотношению $\bar{\alpha} = Nu \cdot \lambda_{\text{воз}} / l$.

Самое существенное влияние на величину Bi оказывает коэффициент теплопроводности влажного тела λ_w , который в сложной форме зависит от влагосодержания, температуры и вида материала – коэффициента теплопроводности сухого материала λ_0 [10–16].

Для установления зависимости коэффициента теплопроводности влажных глин от влагосодержания и температуры изучен ряд источников [10–16], и с возможной точностью установлены закономерности изменения коэффициента теплопроводности различных глин от влагосодержания и температуры. Для влажных силикатных, красных, белых, желтых, каолиновых глин установлено, что максимум в зависимости $\lambda_w = f(\bar{u})$ наблюдается приблизительно в области влагосодержания до $\bar{u} \approx 0,2$ [10, 13, 21, 22]. Причем в области влагосодержаний $\bar{u} = 0,02 - 0,2$ зависимость $\lambda_w = f(\bar{u})$ при температурах $t \approx 45 - 60$ °С близка к линейной.

Белые каолиновые глины в промышленности идут на изготовление фарфоровых, фаянсовых изделий, силикатные глины – на изготовление керамических изделий и плит. Для установления зависимости $\lambda_w = f(\bar{u})$ для глины и керамики по результатам исследования проведена обработка полученных данных на основе формулы В. И. Дубницкого [1, 10, 21] и получены расчетные уравнения. Для керамических влажных плиток, пластин глины и войлока:

$$\lambda_{\text{вл}} = \lambda_0 + A_1 \bar{t} \bar{u} \exp(-B_0 \bar{u}); \quad \lambda_{\text{вл}} \approx \lambda_0 + 2,7 \cdot 10^{-3} \bar{t} \bar{u} \exp(2\bar{u});$$

$$\lambda_{\text{вл}} \approx \lambda_0 + 0,026W,$$

где $A_1 \approx 0,075$; $B_0 = 2$; $\lambda_0 = 0,8$ Вт/м °С; W – влагосодержание, %; для влажных глин $A_1 = 0,135$; $B_0 = 2$.

На рис. 2б даны зависимости $\lambda_w = f(\bar{u})$ для керамики и глины.

Согласно экспериментальным данным В. П. Журавлевой [12], по сушке обожженной керамической плитки в области влагосодержания $\bar{u} = 0,02 - 0,18$ при температурах $t \approx 50 - 60$ °С коэффициент теплопроводности λ_w значительно выше, чем для влажной керамики. Обжиг материалов значительно увеличивает значения λ_w и особенно с повышением температуры и уменьшением влагосодержания [12, 13]. Табличные данные источников [10–16] дают значения для сухой керамической плитки и керамических изделий $\lambda_0 \approx 0,8 - 1,2$ Вт/м °С, а для обожженной плитки $\lambda_0 \approx 1,7 - 3,7$ Вт/м °С [12]. Но влияние влажности на λ_w выше, чем температуры [13–14].

Коэффициент теплопроводности λ_0 сухих красных (производство кирпича), силикатных (керамические изделия) и белых каолиновых (производство фаянса и фарфора) глин, по табличным данным, составляет $\lambda_0 \approx 0,5 - 0,85$ Вт/м °С [10, 12–15].

Критерии подобия тепломассообмена.

Температурный коэффициент сушки

Сушка тонких и толстых материалов показала различный характер изменения температурных кривых $\bar{t} = f(\bar{u})$ и существенное различие в значениях температурного коэффициента сушки $b = d\bar{t} / d\bar{u}$, который являет-

ся важной характеристикой ее кинетики [2, 17, 22]. Авторы [5, 23–25] для более полной оценки деления материалов на тонкие и толстые предложили использовать решения системы дифференциальных уравнений, которые устанавливают зависимость процесса сушки от большой группы критериев подобия тепломассопереноса [3, 4, 23, 24]. Для условий конвективной сушки для безразмерной температуры и температурного коэффициента сушки можно записать [3, 10, 17, 23]:

$$T = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{м.т}} = f(Bi, Bi_m, Fo, Fo_m, Lu, Pn);$$

$$b = \frac{dT / dFo}{d\bar{U} / dFo} = f(Bi, Fo, Lu), \quad (2)$$

где $\bar{U} = \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_0 - u_p}$, Bi , Bi_m , Fo , Fo_m – тепло- и массообменные критерии

Био и Фурье; Lu , Pn – критерии Лыкова и Поснова.

В случае сушки тонких материалов отмечаются периоды ее постоянной скорости и постоянной температуры на уровне $t_{м.т}$. При значениях теплообменного числа $Bi < 1$ происходит быстрое выравнивание температур по поверхности и объему и тепловлагообмен происходит с поверхности материала [7, 8].

При сушке толстых материалов критическое влагосодержание $\bar{u}_{кр}$ отмечается только на кривых сушки [2, 17]. Температура возрастает сразу от начальной t_n .

Эксперименты по сушке тонких и толстых образцов керамики и пластин глины при режимах сушки $t_c = 90–150$ °С показали, что для тонких образцов керамики и глины перепады температур внутри тела $t_n - t_c$ составляли для керамики $\Delta t = 4–5$ °С, для глины $\Delta t = 2–3$ °С. Для толстых образцов ($\delta = 30; 50$ мм): $\Delta t = 10–15$ °С – для керамики; $\Delta t = 10–12$ °С – для глины [2, 17].

Возникающие градиенты влагосодержания и температуры в теле направлены противоположно и препятствуют переносу влаги к поверхности материала [1, 4, 5].

Термовлагопроводность (термодиффузия) определяется критерием Поснова

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

где $\Delta t = t_n - t_c$; δ_T – термоградиентный коэффициент; $\Delta u = \bar{u}$ – влагосодержание, соответствующее Δt .

Критерий Поснова влияет только на массоперенос [2, 3, 5, 23, 24]. Для тонких материалов с малыми перепадами температур $Pn \rightarrow 0$. С уве-

личением градиента температуры в толстых материалах Pn увеличивается. Для силикатных, красных, белых каолиновых глин критерий Поснова изменяется в пределах $Pn \approx 0,07-0,14$ [5]. Большие значения соответствуют толстым глинам. На рис. 3а даны зависимости $Pn = f(\bar{u})$: кривая 1 – красные глины; 2 – белые глины. На рис. 3б кривая 5 – для красной глины толщиной $\delta = 50$ мм.

Сушка тонких материалов протекает при малых величинах чисел Био ($Bi < 1$) и очень незначительных значениях критерия Pn . При этом в тонких материалах влага к поверхности перемещается в виде жидкости и критерий фазового превращения $\varepsilon \approx 0$ и ε не влияет на температурный коэффициент сушки [5, 23, 24].

При сушке толстых образцов пластин глин ($\delta = 30; 50$ мм) влага через границу зоны углубления к поверхности перемещается преимущественно в виде пара $\varepsilon = 0,75$ [5, 17]. Существенное влияние на тепломассоперенос оказывает критерий $Lu = a_m/a$ (где a_m и a – коэффициенты диффузии массы и теплоты).

При малых значениях Lu перенос температуры происходит значительно быстрее, чем влагосодержания [5, 17], и критерий Lu оказывает основное воздействие на теплоперенос, температурный коэффициент сушки увеличивается с уменьшением Lu .

Анализ источников позволяет приближенно указать границы изменения Lu [5]. Для красных глин $Lu = 0,04-0,13$, для белых $Lu = 0,05-0,23$. При сушке керамики отмечаются очень низкие значения $Lu = (0,1-0,17) \times 10^{-2}$ [12] и очень высокие коэффициенты теплопроводности (при $\bar{u} = 0,02-0,18$) $\lambda_0 \approx 1,7-3,7$ Вт/м °С, большие значения характерны для обожженной керамики).

На рис. 3а даны зависимости критерия Поснова Pn от влагосодержания $\bar{u}$ для процесса сушки красных глин (1), белых каолиновых глин (2) и зависимость критерия Лыкова Lu от влагосодержания $\bar{u}$ для белых глин (3). На рис. 3б даны зависимости критерия Lu от влагосодержания $\bar{u}$ для пористой керамики (4) и критерия Поснова Pn от влагосодержания $\bar{u}$ при сушке толстой пластины глины $\delta = 50$ мм (5). Из всей группы критериев подобия в основу классификации процесса конвективной сушки положены числа Bi , Bi_m , Fo , Fo_m и число Lu , которые являются количественными факторами, характеризующими задачу переноса теплоты и влаги [3, 5, 23–25]. По величине критерия Lu все материалы разбиты на три группы: 1 – $Lu = 0,1-0,5$; 2 – $Lu = 0,02-0,12$; 3 – $Lu = 0,05-0,2$ [5, 23]. Недостаток классификации материалов по Bi , Bi_m и Lu заключается в том, что коэффициенты диффузии теплоты a и массы a_m зависят не только от температуры и влагосодержания, вида материала, но и от режима и метода сушки [5].

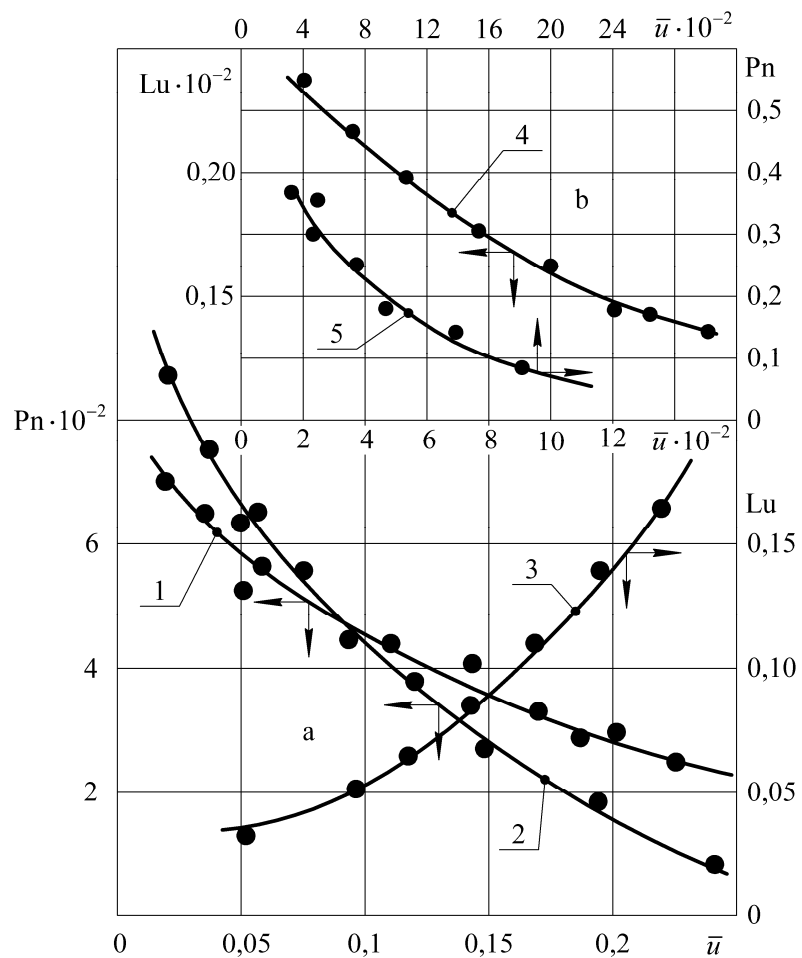


Рис. 3. Зависимость критерия Поснова Pn от влагосодержания $\bar{u}$ в процессах конвективной сушки красных глин (1), белых каолиновых глин (2) и зависимость критерия Лыкова Lu от влагосодержания $\bar{u}$ в процессе сушки каолиновых глин (3) (a); зависимость критерия Лыкова Lu от влагосодержания $\bar{u}$ для пористой керамики (4) и зависимость критерия Поснова Pn от влагосодержания $\bar{u}$ в процессе сушки толстой пластины глины $\delta = 50$ мм (5) (b)

Fig. 3. Dependence of Posnov's criterion Pn on moisture content $\bar{u}$ in the process of convective drying of red clays (1), white kaolin clays (2) and dependence of Lykov's criterion Lu on moisture content $\bar{u}$ in the process of drying kaolin clays (3) (a); dependence of Lykov's criterion Lu on moisture content $\bar{u}$ for porous ceramics (4) and dependence of Posnov's criterion Pn on moisture content $\bar{u}$ in the process of drying a thick clay plate $\delta = 50$ mm (5) (b)

Рассматривая процесс сушки как тепломассообменный процесс, выделяют следующие задачи [5].

1. При значениях чисел $Bi, Bi_m < 0,5$ скорость сушки не зависит от внутреннего сопротивления переносу ($Pn \approx 0$), а определяется внешними условиями теплообмена (внешняя задача) [4, 5, 9].

2. При значениях чисел $0,5 < Bi, Bi_m < 50$ сушка протекает в условиях, характерных для смешанной задачи, когда сопротивление переносу влаги внутри и внешнее сопротивление при удалении влаги с поверхности примерно одинаковы [4, 5, 9]. Критерий $Pn > 0$ [3, 5, 23].

3. При больших значениях чисел Био, когда $Bi, Bi_m > 50$, главными являются условия массообмена внутри тела и режим сушки (внутренняя задача). Диффузионное сопротивление переносу влаги внутри влажного тела значительно больше сопротивления при удалении влаги с поверхности материала. Значительную роль в переносе влаги к поверхности играет термодиффузия. Критерий $Pn \approx 0,2 - 0,5$ (рис. 3b, кривая 5).

Сушка толстых материалов.

Кинетика сушки. Вывод уравнений

Основное уравнение кинетики сушки А. В. Лыкова имеет вид [1, 4, 5]

$$\frac{q_{II}}{q_I} = N^* \left(1 + \frac{c_w}{r} \cdot \frac{d\bar{t}}{d\bar{u}} \right), \quad (3)$$

где q_I, q_{II} – плотности потока теплоты в первом и втором периодах сушки; N^* – относительная скорость сушки; c_w – удельная теплоемкость влажного тела; r – теплота парообразования; $d\bar{t} / d\bar{u}$ – температурный коэффициент сушки,

$$b = \frac{d\bar{t}}{d\bar{u}}; \quad (4)$$

комплекс $\frac{c_w b}{r} = Rb$ – число Ребиндера.

В расчеты по кинетике сушки А. И. Лыковым была введена безразмерная величина – относительный температурный коэффициент сушки

$$B = b \frac{\Delta\bar{u}}{\Delta T} = f(\bar{u}). \quad (5)$$

В качестве определяющих параметров в расчетах средней температуры удобно принимать: $\Delta\bar{u} = \bar{u}_{кр}$; $\Delta T = T_c$, где $\bar{u}_{кр}$ – критическое влагосодержание; T_c – абсолютная температура среды.

Запишем выражения (4) и (5) [19, 26, 28] в виде:

$$\frac{\bar{t}}{T_c} = \int \frac{B(\bar{u})}{\bar{u}_{кр}} d\bar{u} + C_1; \quad (6)$$

$$\bar{t} = \int b(\bar{u}) d\bar{u} + C_2. \quad (7)$$

Произвольная постоянная C_1 выбирается в зависимости от температуры среды T_c , произвольная постоянная C_2 – в зависимости от температуры $t_{м.т}$ и T_c на границе перехода первого периода сушки во второй.

Для многих влажных материалов зависимости для $Rb = f(\bar{u})$; $B = f(\bar{u})$ и температурного коэффициента сушки $b = f(\bar{u})$ выражаются эмпирическими формулами [1, 4, 5, 18]:

$$\begin{aligned} Rb &= A \exp[-n_0(\bar{u} - u_p)]; \\ B &= a \exp[-m(\bar{u} - u_p)]; \\ b &= D \exp[-m_0(\bar{u} - u_p)]. \end{aligned} \quad (8)$$

Для определения средней температуры воспользуемся более простым уравнением (8) [26].

Значения коэффициентов в формулах находятся опытным путем. Подставляя в (7) уравнение (8) и интегрируя в пределах $t_{м.т}$, t_c и влагосодержаний, получим [19, 26, 28]:

$$\bar{t} = t_{м.т} + \frac{D_0}{m_0} \exp[-m_0(\bar{u} - u_p)]; \quad (9)$$

$$\bar{t} = t_c - \frac{D}{m} [1 - \exp[-m(\bar{u} - u_p)]]; \quad (10)$$

Обработкой экспериментальных данных по сушке керамики, листового асбеста, шерстяного войлока, пластин глины получены уравнения для коэффициентов D_0 и D в формулах (9) и (10):

$$D_0 \approx 10^3 (1,1 - 1,15 \bar{u}_{кр});$$

$$D \approx \frac{t_c}{0,115 + 0,15 \bar{u}_{кр}}.$$

Значения коэффициентов m и m_0 в формулах (9) и (10) даны в табл. 1.

Результаты обработки опытных данных для зависимостей коэффициентов $D_0 = f(\bar{u}_{кр})$ и $D = f(\bar{u}_{кр})$ даны на рис. 1с и 2д. Кривые на рис. 1с представляют собой ветви гиперболы.

Таблица 1

Значения постоянных в расчетных уравнениях по сушке керамики и глины

Values of constants in calculation equations for drying ceramics and clay

Материал и режим сушки	m_0	m	m_1	m_2	b_1	b_{II}	A	n
Тонкая керамика: $\delta = 5-10$ мм; $t_c = 120$ °C; $v = 5-10$ м/с	16	8	0,7	–	–	–	0,75	0,73
Тонкая керамика: $\delta = 5-10$ мм; $t_c = 120$ °C; $v = 5-10$ м/с	–	19	–	1,1	460	280	0,75	0,73
Тонкие пластины глины: $\delta = 12-15$ мм; $t_c = 90-120$ °C; $v = 5$ м/с	18	5	0,9	–	–	–	0,45	0,9
Толстая глина: $\delta = 20-50$ мм; $t_c = 90-120$ °C; $v = 3-5$ м/с	–	17	–	0,9	450	310	0,45	0,9

Толстые материалы.

Зональный метод расчета средней температуры

Сушка толстых материалов протекает без периода постоянной температуры. Температура повышается с начала сушки от $\bar{u}_0$ от начальной $t_n = 20$ °C. Критическое влагосодержание $\bar{u}_{кр}$ отмечается только на кривых сушки $\bar{u} = f(\tau)$. Для расчета средней температуры для процесса сушки толстых материалов воспользуемся зональным методом расчета [1, 4, 26]. На рис. 1а, 2а (кривые II) даны температурные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ для сушки толстых образцов керамики и глины ($\delta = 20, 30$ и 50 мм). Для избежания стока влаги с торцов поверхности влагоизолировались. Заменяем плавные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ ломаными прямыми, образуются две зоны, в каждой из которых зависимость между $\bar{t}$ и $\bar{u}$ принимается линейной (рис. 1а, рис. 2а).

Тогда температурный коэффициент сушки для каждой зоны $b = d\bar{t}/d\bar{u} = \text{const}$. Для каждой зоны

$$d\bar{t} = -b d\bar{u}. \quad (11)$$

Интегрируя, получим

$$\Delta\bar{t} = -b(\Delta\bar{u}). \quad (12)$$

Для первой зоны $\bar{u}_{ст} < \bar{u} < \bar{u}_0$, где $\bar{u}_{ст}$ – влагосодержание при стыке зон. При $\bar{u} = \bar{u}_0$ $t = t_n = 20$ °C. Для первой зоны получим

$$t_1 = t_n + b_1(\bar{u}_0 - \bar{u}), \quad (13)$$

где b_1 – средний температурный коэффициент сушки в первой зоне. Для второй зоны при $\bar{u} = u_p$ $t \rightarrow t_c$.

Тогда получим для второй зоны

$$t = t_c - b_2(\bar{u} - u_p). \quad (14)$$

Следовательно, для определения средней температуры необходимо графическим дифференцированием кривых $\bar{t} = f(\bar{u})$ определить температурные коэффициенты сушки b_1 и b_2 для двух зон.

Граница перехода одной зоны в другую через влагосодержание стыковки зон $\bar{u}_{\text{ст}}$ определяется по формуле

$$\bar{u}_{\text{ст}} \approx \frac{1}{b_1 + b_2} (t_c - b_1 \bar{u}_0 + b_2 u_p).$$

А. В. Лыковым решено дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности для влажной пластины для периода падающей скорости сушки при введении в граничные условия уравнения скорости сушки [29]

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = K(\bar{u} - u_p), \quad (15)$$

где коэффициент сушки $K = N / (\bar{u}_{\text{кр}} - u_p)$; N – скорость сушки в первом периоде, являющаяся экспоненциальной функцией времени [1, 3, 4]. Из уравнения (15) получим

$$\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{\text{кр}} - u_p} = \exp(-K\tau). \quad (16)$$

Граничные условия $\frac{\rho r R}{\lambda_w} \cdot \frac{d\bar{u}}{d\tau}$ запишем с учетом (15), (16)

$$\frac{\rho R N r}{\lambda_w} \exp(-K\tau) = \frac{j r}{\lambda_w} \exp(-K\tau), \quad (17)$$

где $j = \rho R N$ – интенсивность сушки ($\text{кг/м}^2 \text{ с}$).

В результате решения дифференциального уравнения с граничными условиями (17) получено уравнение для относительной температуры [16]

$$T^* = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{\text{м.т.}}}. \quad (18)$$

В процессах конвективной сушки температура изменяется с одновременным изменением влагосодержания. Запишем

$$\frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{\text{м.т.}}} = f\left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}}\right). \quad (19)$$

Обработка опытных данных по сушке ряда влажных материалов показала, что средняя температура в периоде падающей скорости хорошо описывается зависимостью (19) [28]

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{\text{м.т.}}) \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right)^{m_1} \quad (20)$$

Для толстых материалов уравнение имеет вид

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_n) \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_0} \right)^{m_2} \quad (21)$$

Результаты расчетов основных параметров сушки, критериев подобия тепломассообмена и расчеты средней температуры в процессах сушки керамики и глин и сопоставление значений с экспериментальными данными даны в табл. 2–5. Сравнение расчетных значений температур по формулам с опытными данными показало достаточно хорошее совпадение в пределах погрешности эксперимента.

Таблица 2

Значения критериев подобия и коэффициентов тепло- и массообмена в процессе конвективной сушки тонких керамических плиток

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

Тонкая керамическая плитка $120 \times 80 \times 5$ мм; $\rho_0 = 1860$ кг/м ³ ; $\lambda_0 = 0,8$ Вт/(м·°C); $\bar{u}_0 = 0,2$; $\bar{u}_{\text{кр}} = 0,1$; $u_p = 0$; $N = 0,022$ мин ⁻¹ ; $t_{\text{м.т.}} = 46$ °C. Режим тепловой обработки: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %								
$\bar{u}$	λ_w , Вт/(м·°C)	$\bar{\alpha}$, Вт/(м ² ·°C)	Bi	$\bar{\alpha}_m$, кг/ч °М	λ_m , кг/м ч °М	$\text{Bi}_m = \bar{\alpha}_m R / \lambda_m$	$\text{Lu} \cdot 10^{-2}$	$\text{Pn} \cdot 10^{-2}$
0,08	1,11	47	0,105	26,4	0,235	0,27	0,18	6,0
0,06	1,05	39	0,093	20,2	0,221	0,21	0,19	7,0
0,04	0,98	30	0,076	16,4	0,198	0,18	0,22	8,0
0,02	0,89	22	0,062	14,5	0,185	0,16	0,24	8,5
Примечания: $\bar{\alpha}$ – коэффициент теплоотдачи, Вт/м ² °C; $\bar{\alpha}_m$ – то же массоотдачи, кг/(ч·°М); °М – водяной градус; λ_m – коэффициент влагопроводности, кг/(м·ч·°М); Bi_m – массообменное число Био, $\bar{\alpha}_m R / \lambda_m$; R – половина толщины пластины.								

Таблица 3

Расчетные значения коэффициента теплоотдачи, коэффициента теплопроводности, числа Био и сопоставление расчетных значений температур с экспериментом в процессе сушки обожженной и влажной тонкой пластины керамики

Calculated values of heat transfer coefficient, thermal conductivity coefficient, Biot number, and comparison of calculated temperature values with experiment in the process of drying fired and wet thin ceramic plate

Обожженная керамическая плитка $120 \times 80 \times 5$ мм; $\rho_0 = 1860$ кг/м ³ ; $\lambda_0 = 1,5$ Вт/(м·°C); $\bar{u}_0 = 0,2$; $\bar{u}_{\text{кр}} = 0,11$; $u_p = 0$; $t_{\text{м.т.}} = 46$ °C. Режим сушки: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %								
$\bar{u}$	$\bar{\alpha}$, Вт/(м ² ·°C)	λ_w , Вт/(м·°C)	$\text{Bi} = \bar{\alpha} R / \lambda_w$	$\text{Bi} = \bar{\alpha} \delta / \lambda_w$	$\bar{t}$, °C экс	$\bar{t}$, °C (9)	$\bar{t}$, °C (10)	$\bar{t}$, °C (20)
0,1	52,0	1,85	0,067	0,15	53	54,6	53,5	52
0,08	47,4	1,78	0,068	0,14	60	60,8	59,5	62

Окончание табл. 3

End of Table 3

$\bar{u}$	$\bar{\alpha},$ Вт/(м ² ·°C)	$\lambda_w,$ Вт/(м·°C)	$Bi = \bar{\alpha}R / \lambda_w$	$Bi = \bar{\alpha}\delta / \lambda_w$	$\bar{t},$ °C экс	$\bar{t},$ °C (9)	$\bar{t},$ °C (10)	$\bar{t},$ °C (20)
0,06	39,6	1,67	0,059	0,12	70	71,7	69,6	70
0,04	31,2	1,61	0,052	0,11	81	79,2	83,4	83
0,02	19,6	1,56	0,034	0,08	92	89,8	95,0	95
Влажная керамическая плитка 120×80×5 мм; $\rho_0 = 1860$ кг/м ³ ; $\lambda_0 = 0,8$ Вт/м °C; $\bar{u}_0 = 0,24$; $\bar{u}_{кр} = 0,14$; $u_p = 0$; $t_{м.т} = 48$ °C. Режим сушки: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %								
0,1	48,5	1,15	0,19	0,51	61	60,2	61,0	63,2
0,08	38,6	0,98	0,18	0,46	65	63,5	68,2	65,0
0,06	34,5	0,87	0,18	0,45	73	71,5	73,4	71,5
0,04	26,3	0,81	0,15	0,40	82	80,5	84,5	83,5
0,02	19,7	0,62	0,13	0,36	102	99	102	101

Таблица 4

Расчетные значения коэффициента теплоотдачи, коэффициента теплопроводности, числа Био и сравнение расчетных значений средних температур с экспериментом в процессе сушки толстых образцов керамики

Calculated values of heat transfer coefficient, thermal conductivity coefficient, Biot number and comparison of calculated values of average temperatures with experiment in the process of drying thick ceramic samples

Керамическая плитка 130×110×30 мм; $\rho_0 = 1860$ кг/м ³ ; $\lambda_0 = 0,8$ Вт/(м·°C); $\bar{u}_0 = 0,23$; $\bar{u}_{кр} = 0,165$; $t_n = 20$ °C. Режим сушки: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %								
$\bar{u}$	$\bar{\alpha},$ Вт/(м ² ·°C)	$\lambda_w,$ Вт/(м·°C)	$Bi = \bar{\alpha}R / \lambda_w$	$Bi = \bar{\alpha}\delta / \lambda_w$	$\bar{t},$ °C экс	$\bar{t},$ °C (10)	$\bar{t},$ °C (13)	$\bar{t},$ °C (21)
0,10	57	1,21	0,70	1,45	84	82,5	82,5	85
0,06	36	1,10	0,52	1,16	96	94,5	97,5	97
0,03	23	0,92	0,42	0,94	103	104,0	106	106
0,02	17	0,86	0,35	0,78	107	108,0	110	109
Керамическая плитка 130×110×50 мм; $\rho_0 = 1880$ кг/м ³ ; $\lambda_0 = 0,5$ Вт/(м·°C); $\bar{u}_0 = 0,24$; $\bar{u}_{кр} = 0,17$; $u_p = 0$; $t_n = 20$ °C. Режим сушки: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %								
0,10	47,5	1,15	1,02	2,10	85	85,5	86,0	83
0,08	39,6	1,12	0,93	1,83	90	88,5	87,5	88
0,06	30,5	1,05	0,84	1,50	96	97,5	98,5	97
0,04	24,4	0,94	0,68	1,34	102	105	104	101
0,02	19,6	0,87	0,60	1,16	108	110	110	112

Таблица 5

Расчетные значения коэффициента теплоотдачи, коэффициента теплопроводности, числа Био и сравнение расчетных значений температуры с экспериментом в процессе сушки тонких и толстых пластин глин
Calculated values of heat transfer coefficient, thermal conductivity coefficient, Biot number and comparison of calculated temperature values with experiment in the process of drying thin and thick clay plates

Пластина глины $135 \times 110 \times 12$ мм; $\rho_0 = 1960$ кг/м ³ ; $\lambda_0 = 0,5$ Вт/(м·°C); $\bar{u}_0 = 0,20$; $\bar{u}_{кр} = 0,11$; $u_p = 0$; $t_{м.т.} = 42$ °C. Режим сушки: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %								
$\bar{u}$	$\bar{\alpha},$ Вт/(м ² ·°C)	$\lambda_w,$ Вт/(м·°C)	$Bi = \bar{\alpha}R / \lambda_w$	$Bi = \bar{\alpha}\delta / \lambda_w$	$\bar{t},$ °C экс	$\bar{t},$ °C (9)	$\bar{t},$ °C (10)	$\bar{t},$ °C (20)
0,10	18,6	1,15	0,095	0,24	58	57	56	58
0,06	14,7	0,95	0,087	0,20	68	70	69	69
0,04	11,4	0,86	0,082	0,15	79	82	81	75
0,02	8,7	0,65	0,058	0,13	88	87	91	87
Пластина глины $130 \times 110 \times 30$ мм; $\rho_0 = 1900$ кг/м ³ ; $\lambda_0 = 0,5$ Вт/(м·°C); $\bar{u}_0 = 0,20$; $\bar{u}_{кр} = 0,12$; $u_p = 0$; $t_n = 20$ °C. Режим сушки: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %								
0,10	22,6	1,11	0,35	0,91	65	62	61	64
0,08	17,8	0,96	0,28	0,75	75	75	74	74
0,06	13,6	0,85	0,24	0,66	82	83	82	83
0,04	9,8	0,76	0,20	0,42	92	94	91	94
0,02	6,5	0,66	0,14	0,37	100	98	102	102
Пластина глины $130 \times 100 \times 50$ мм; $\rho_0 = 1950$ кг/м ³ ; $\lambda_0 = 0,55$ Вт/(м·°C); $\bar{u}_0 = 0,20$; $\bar{u}_{кр} = 0,17$; $t_n = 20$ °C. Режим сушки: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %								
0,14	30,5	1,15	0,65	1,54	45	42	45	44
0,10	22,6	0,97	0,58	1,18	63	61	62	60
0,08	17,7	0,92	0,49	1,14	70	68	72	68
0,06	12,5	0,75	0,41	0,86	80	79	79	78
0,04	9,6	0,70	0,34	0,69	88	90	88	87
0,02	5,8	0,57	0,27	0,54	98	100	97	100

ВЫВОДЫ

1. Деления материалов на тонкие и толстые в процессе сушки по числу Био недостаточно, поскольку величина Био зависит от многих факторов.
2. Рассмотрены влияние критериев подобия тепломассообмена на температурный коэффициент сушки и зависимость чисел Био от температурного коэффициента сушки.
3. Изложен комплексный метод деления материалов по величинам чисел Био и критерия Лыкова на четыре группы.
4. Представлены расчеты средней температуры в процессе сушки тонких и толстых материалов по полученным формулам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1968. 472 с.
2. Ольшанский, А. И. Исследование процесса конвективной сушки тонких и толстых влажных материалов / А. И. Ольшанский, В. И. Ольшанский // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2012. Т. 57. № 4. С. 78–88.
3. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. 535 с.
4. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. Минск: Беларус. наука, 2010. 443 с.
5. Сажин, Б. С. Научные основы техники сушки / Б. С. Сажин. М.: Наука, 1997. 447 с.
6. Лыков, А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки / А. В. Лыков. М.: Госэнергоиздат, 1956. 464 с.
7. Ольшанский, А. И. Исследование сушки тонких материалов с использованием обобщенных комплексных переменных / А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89, №4. С. 884–894.
8. Рабинович, Г. Д. Новый метод расчета конвективной сушки тонких материалов / Г. Д. Рабинович // Инженерно-физический журнал. 1966. Т. 11, № 2. С. 182–192.
9. Рудобашта, С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. М.: Химия, 1980. 248 с.
10. Лыков, А. В. Теоретические основы строительной теплофизики / А. В. Лыков. Минск: Изд-во Академии наук БССР, 1961. 519 с.
11. Лыков, А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах / А. В. Лыков. М.: Гостехиздат, 1954. 296 с.
12. Журавлева, В. П. Массоперенос при термообработке и сушке капиллярнопористых строительных материалов / В. П. Журавлева. Минск: Наука и техника, 1972. 189 с.
13. Франчук, А. У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов / А. У. Франчук. М.: НИИ строительной физики, 1969. 142 с.
14. Блази, В. Строительная физика: справ. проектировщика / В. Блази. М.: Техносфера, 2005. 536 с.
15. Григорьев, И. С. Физические величины: справочник / И. С. Григорьев, Е. З. Мейлихов. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
16. Лыков, А. В. Тепло-массообмен: справ. / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1972. 552 с.
17. Куц, П. С. Зависимость температурного коэффициента сушки от критериев подобия тепло- и массообмена при различных значениях теплообменного числа Био / П. С. Куц, А. И. Ольшанский, Е. Л. Бром // Инженерно-физический журнал. 1977. Т. 33, № 1. С. 836–840.
18. Куц, П. С. Некоторые закономерности тепловлагообмена и приближенные методы расчета кинематики процесса сушки влажных материалов / П. С. Куц, А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 1977. Т. 32, № 5. С. 1007–1014.
19. 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>.
20. Ольшанский, А. И. Исследование кинетики тепловлагообмена при термической обработке и сушке тонких влажных теплоизоляционных материалов / А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев // Энергетика. Изв. высш. учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 1. С. 66–79. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-66-79>.
21. Ольшанский, А. И. Экспериментальное исследование кинетики сушки тонких плоских влажных материалов методом регулярного режима с использованием обобщенных комплексных переменных / А. И. Ольшанский, А. М. Гусаров // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90, № 3. С. 700–713.
22. Ольшанский, А. И. Аналитический расчет температуры в процессе сушки тонких капиллярно-пористых плоских материалов / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гу-

- саров // 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>.
23. Михайлов, Ю. А. Влияние критериев подобия на тепло- и массообмен при конвективной сушке / Ю. А. Михайлов // Известия Академии наук Латвийской ССР. 1957. № 6. С. 878–893
24. Мельникова, И. С. Определение некоторых критериев переноса тепла и вещества при испарении из твердых тел / И. С. Мельникова // Тепло- и массообмен в процессах испарения: сб. ст. М.: Изд-во АН СССР, 1958. С. 121–126.
25. Ольшанский, А. И. Регулярный тепловой режим и влияние критериев подобия тепло-массообмена на процесс конвективной сушки пористой керамики / А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89, № 1. С. 37–48.
26. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. М.: Энергия, 1973. 288 с.
27. Васильев, В. Н. Технология сушки. Основы тепло- и массопереноса / В. Н. Васильев, В. Е. Куцакова, С. В. Фролов. Санкт-Петербург: ГИОРД, 2013. 224 с.
28. 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.
29. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. М.: Высш. шк., 1967. 600 с.

Поступила 14.11.2024 Подписана в печать 15.01.2025 Опубликовано онлайн 30.09.2025

REFERENCES

1. Lykov A. V. (1968) *Drying Theory*. Moscow, Energiya Publ. 472 (in Russian).
2. Olshanskii A. I., Olshanskii V. I. (2012) Study of the Process of Convective Drying of Thin and Thick Wet Materials. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 57 (4), 78–88 (in Russian).
3. Lykov A. V., Mikhailov Yu. A. (1963) *Theory of Heat and Mass Transfer*. Moscow–Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 535 (in Russian).
4. Akulich P. V. (2010) *Calculations of Drying and Heat Exchange Installations*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 443 (in Russian).
5. Sazhin B. S. (1997) *Scientific Fundamentals of Drying Technology*. Moscow, Nauka Publ. 447 (in Russian).
6. Lykov A. V. (1956) *Heat and Mass Transfer in Drying Processes*. Moscow, Gosenergoizdat Publ. 464 (in Russian).
7. Olshanskii A. I. (2016) Investigation of Drying of Thin Materials Using Generalized Complex Variables. *Inzhenerno-Fizichesky Zhurnal = Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 89 (4), 886–895. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1450-4>.
8. Rabinovich G. D. (1966). A New Method of Calculation of Convective Drying of thin Materials. *Journal of Engineering Physics*, 11(2), 98–104. <https://doi.org/10.1007/bf00831262>.
9. Rudobashta S. P. (1980) *Mass Transfer in Systems with Solid Phase*. Moscow, Khimiya Publ. 248 (in Russian).
10. Lykov A. V. (1961) *Theoretical Foundations of Construction Thermophysics*. Minsk: Publishing House of the Academy of Sciences of the BSSR. 519 (in Russian).
11. Lykov A. V. (1954) *Transfer Phenomena in Capillary-Porous Bodies*. Moscow, Gostekhizdat Publ. 296 (in Russian).
12. Zhuravleva V. P. (1972) *Mass Transfer During Heat Treatment and Drying of Capillary-Porous Construction Materials*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 189 (in Russian).
13. Franchuk A. U. (1969) *Tables of Thermal Performance Indicators of Construction Materials*. Moscow, Publishing House of Research Institute of Construction Physics. 142 (in Russian).
14. Blasi V. (2005) *Construction Physics. Designer's Handbook*. Moscow, Tekhnosfera Publ. 536 (in Russian).
15. Grigoriev I. S., Meilikhov E. Z. (1991) *Physical Quantities*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1232 (in Russian).

16. Lykov A. V. (1972) *Heat and Mass Transfer*. Moscow, Energiya Publ. 552 (in Russian).
17. Kuts P. S., Ol'shanskii A. I., Brom E. L. (1977) Dependence of the Temperature Coefficient of drying on the Heat- And Mass-Transfer Similarity Criteria for Various values of the Heat-Transfer Biot Number. *Journal of Engineering Physics*, 33 (1), 836–840. <https://doi.org/10.1007/bf00861427>.
18. Kuts P. S., Ol'shanskii A. I. (1977) Some Features of Heat and Moisture Transfer and Approximate Methods of Calculating the drying Kinetics of Moist Materials. *Journal of Engineering Physics*, 32 (6), 650–656. <https://doi.org/10.1007/bf00862568>
19. 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).
20. 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).
21. Ol'shanskii A. I., Gusarov A. M. (2017) Experimental Study of the Kinetics of Drying of Thin Plane Moist Materials by the Regular-Regime Method Using Generalized Complex Variables. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 90 (3), 665–678. <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1614-x>.
22. 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. *Vestsi Natsyyanal'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).
23. Mikhailov Yu. A. (1957) Influence of Similarity Criteria on Heat and Mass Transfer During Convective Drying. *Izvestiya Akademii Nauk Latvyskoy SSR* [Proceedings of the Academy of Sciences of the Latvian SSR], (6), 878–893 (in Russian).
24. Melnikova I. S. (1958) Determination of Some Criteria for the Transfer of Heat and Matter During Evaporation from Solids. *Heat and Mass Transfer in Evaporation Processes: Collection of Articles*. Moscow, Publishing House of USSR Academy of Sciences, 121–126 (in Russian).
25. Ol'shanskii A. I. (2016) Regular Thermal Regime and Influence of Heat and Mass Transfer Similarity Criteria on the Process of Convective Drying of Porous Ceramics. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 89 (1), 38–49. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1351-6>.
26. Krasnikov V. V. (1973) *Conductive Drying*. Moscow, Energiya Publ. 288 (in Russian).
27. Vasiliev V. N., Kutsakova V. E., Frolov S. V. (2013) *Drying Technology. Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Saint Petersburg, GIOR Publ. 224 (in Russian).
28. 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 (3), 622–633. <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0876-1>.
29. Lykov A. V. (1967) *Theory of Heat Transfer*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 600 (in Russian).

Received: 14 November 2024 Accepted: 15 January 2025 Published online: 30 September 2025