

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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 68, № 3
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

- Румянцев В. Ю., Румянцев Ю. В., Романюк Ф. А., Дерюгина Е. А.** Повышение быстродействия цифрового фильтра Фурье в измерительных органах микропроцессорных защит 193
- Гречихин Л. И.** Вольт-амперные характеристики выпрямительных диодов металл – полупроводник. Ч. 1: Формирование токов проводимости и токов смещения на $p-n$ переходе 209

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Романюк В. Н., Нияковский А. М., Струцкий Н. В., Свистун А. Л.** Почвенно-грунтовые факторы, влияющие на процесс коррозии стальных подземных трубопроводов, и их компьютерное моделирование 230
- Ольшанский А. И., Жерносек С. В.** Температура в периоде падающей скорости сушки тонких плоских капиллярно-пористых влажных материалов 245
- Седнин В. А., Храмцов П. П., Седнин Н. А.** Аналитическое решение математической модели анаэробного брожения в проточном биореакторе при производстве биогаза 259

ЭКОНОМИКА ЭНЕРГЕТИКА

- Зорина Т. Г., Александрович С. А., Кондрусев В. Ю., Старостенко К. В.** Методический подход к оценке затрат на увеличение электропотребления в Республике Беларусь в условиях развития атомной энергетики 274

Главный редактор Александр Михайлович Маляревич

Редакционная коллегия

- К. В. ДОБРЕГО* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
В. ВУЙЦИК (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
В. В. ГАЛАКТИОНОВ (Русский институт управления имени В. П. Чернова, Москва, Российская Федерация),
М. ДАДО (Зволенский технический университет, Зволен, Словацкая Республика),
П. В. 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),
В. Ю. РУМЯНЦЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
А.-С. С. САУХАТАС (Рижский технический университет, Рига, Латвийская Республика),
В. С. СЕВЕРЯНИН (Брестский государственный технический университет, Брест, Республика Беларусь),
В. А. СЕДНИН (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Б. С. СОРОКА (Институт газа НАН Украины, Киев, Украина),
В. А. СТРОЕВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),
Е. В. ТОРОПОВ (Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация),
Г. Н. УЗАКОВ (Каршинский инженерно-экономический институт, Карши, Республика Узбекистан),
Б. М. ХРУСТАЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Л. В. ШЕНЕЦ (РУП «Белинвестэнергосбережение», Минск, Республика Беларусь)

Ведущий научный редактор В. Н. Гурьянчик

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

Подписано к печати 30.05.2025. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,25. Уч.-изд. л. 9,31. Тираж экз.
Дата выхода в свет . 2024. Заказ .

Адрес редакции: 220013, г. Минск, Республика Беларусь, пр. Независимости, 65.
Белорусский национальный технический университет, корп. 2, комн. 327.
Тел.: +375 17 320-65-14
e-mail: energy@bntu.by; <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 3
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

- Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Dziaruhina A. A.** Performance Increase of the Digital Fourier Filter in Measuring Bodies of Microprocessor Protections 193
- Gretchikhin L. I.** Volt-ampere Characteristics of Metal-semiconductor Rectifier Diodes. Part 1: Formation of Conduction Currents and Displacement Currents at the $p-n$ Junction 209

HEAT POWER ENGINEERING

- Romaniuk V. N., Niyakovskii A. M., Strutsky N. V., Svistun A. L.** Soil and Ground Factors Affecting the Steel Underground Pipelines Corrosion Process and their Computer Simulation 230
- Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V.** Temperature in the Period of Decreasing Drying Rate of Thin Flat Capillary-Porous Wet Materials 245
- Sednin V. A., Khramsov P. P., Sednin N. A.** Analytical Solution of the Mathematical Model of Anaerobic Fermentation in a Flow Bioreactor for Biogas Production 259

POWER ENGINEERING ECONOMICS

- Zoryna T. G., Aliaksandrovich S. A., Kondrusev V. Yu., Starostenko K. V.** Methodical Approach to Estimating the Costs of Increasing Electricity Consumption in the Republic of Belarus in the Context of Nuclear Energy Development 274

Editor-in-Chief Aliaksandr M. Maliarevich

Editorial Board

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

Lead Science Editor V. N. Guryanchyk

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

Passed for printing 30.05.2025. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 12,25.
An edition of copies. Date of publishing 2024. Order list .

ADDRESS

Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave., Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 320-65-14
e-mail: energy@bntu.by; <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/10.21122/1029-7448-2025-68-3-193-208>

УДК 621.316.925

Повышение быстродействия цифрового фильтра Фурье в измерительных органах микропроцессорных защит

В. Ю. Румянцев¹⁾, Ю. В. Румянцев¹⁾, Ф. А. Романюк¹⁾, Е. А. Дерюгина¹⁾

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

Реферат. Рассмотрена методика построения цифрового фильтра на основе дискретного преобразования Фурье в составе микропроцессорных защит электроустановок, обладающего повышенным быстродействием в переходном режиме установления его выходного сигнала. Для реализации фильтра предлагается использовать так называемые эквивалентные ортогональные составляющие входного сигнала тока или напряжения, которые являются функцией текущего значения нелинейного корректирующего коэффициента и ортогональных составляющих сигнала основной частоты, выделяемых с помощью цифрового фильтра Фурье. Скорость изменения эквивалентных ортогональных составляющих в переходных режимах определяется характером изменения нелинейного корректирующего коэффициента. Для формирования последнего необходимо иметь две независимые друг от друга переходные характеристики входного сигнала. Ранее предлагалось формировать указанные характеристики с использованием двух цифровых фильтров: собственно фильтра Фурье, выделяющего из входного сигнала действующее значение основной гармоники, и дополнительного фильтра, определяющего действующее значение всего входного сигнала. В настоящей работе предлагается отказаться от дополнительного цифрового фильтра и определять нелинейный корректирующий коэффициент, а также ортогональные составляющие эквивалентного сигнала с использованием непосредственно цифрового фильтра Фурье. В среде динамического моделирования MATLAB-Simulink реализована математическая модель разработанного фильтра и модели элементов для воспроизведения тестовых воздействий. Проверка функционирования модели цифрового фильтра Фурье с ускоренным функционированием в переходном режиме проводилась с использованием нескольких видов тестовых воздействий – синусоидального сигнала с частотой 50 Гц, сигнала с апериодической составляющей, воздействием с высшими гармониками, а также сигналом, приближенным к реальному вторичному току трансформатора тока при коротком замыкании. Проведенные вычислительные эксперименты выявили существенное (до 1,5–1,7 раза) повышение быстродействия в переходном режиме предлагаемого цифрового фильтра по сравнению со стандартным фильтром Фурье.

Ключевые слова: микропроцессорные защиты, дискретное преобразование Фурье, переходный режим, быстродействие, ортогональные составляющие, цифровые фильтры, тестовое воздействие, вычислительный эксперимент, насыщение трансформатора тока, MATLAB, Simulink

Для цитирования: Повышение быстродействия цифрового фильтра Фурье в измерительных органах микропроцессорных защит / В. Ю. Румянцев [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 3. С. 193–208. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-193-208>

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

Performance Increase of the Digital Fourier Filter in Measuring Bodies of Microprocessor Protections

V. Yu. Rumiantsev¹⁾, Yu. V. Rumiantsev¹⁾, F. A. Romaniuk¹⁾, A. A. Dziaruhina¹⁾

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

Abstract. A technique for constructing a digital filter based on the discrete Fourier transform as part of microprocessor protections for electrical installations which is characterized by increased performance in the transient mode of setting its output signal is considered. To implement the filter, it is proposed to use the so-called equivalent orthogonal components of the input current or voltage signal which are a function of the current value of the nonlinear correction factor and the orthogonal components of the fundamental frequency signal isolated using a digital Fourier filter. The rate of change of equivalent orthogonal components in transient modes is determined by the nature of the change in the nonlinear correction factor. To form the latter, it is necessary to have two independent transition characteristics of the input signal. Previously, it was proposed to generate these characteristics using two digital filters, viz. the actual Fourier filter which extracts the actual value of the fundamental harmonic from the input signal and the additional filter which determines the actual value of the entire input signal. In this article, it is proposed to abandon the additional digital filter and determine the nonlinear correction factor, as well as the orthogonal components of the equivalent signal using a direct digital Fourier filter. A mathematical model of the developed filter and element models for reproducing test influences are implemented in the MATLAB-Simulink dynamic simulation environment. The operation of the digital Fourier filter model with accelerated operation in transient mode was tested using several types of test influences, viz. a sinusoidal signal with a frequency of 50 Hz, a signal with an aperiodic component, an influence with higher harmonics, as well as a signal close to the real secondary current of a short circuit current transformer. The computational experiments that had been conducted revealed a significant (up to 1.5–1.7 times) increase in the speed in the transient mode of the proposed digital filter compared to the standard Fourier filter.

Keywords: microprocessor protections, discrete Fourier transform, transient mode, performance, orthogonal components, digital filters, test influence, computational experiment, saturation of a current transformer, MATLAB, Simulink

For citation: Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Dziaruhina A. A. (2025) Performance Increase of the Digital Fourier Filter in Measuring Bodies of Microprocessor Protections. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (3), 193–208. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-193-208> (in Russian)

Введение

В микропроцессорных устройствах релейной защиты в качестве контролируемых параметров широко используются амплитудные или действующие значения входных сигналов, которые определяются по их ортогональным составляющим (ОС), формируемым цифровыми фильтрами (ЦФ) на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ) [1]. К их достоинствам следует отнести возможность выделения основной гармоники из сложного периодического сигнала без частотной фильтрации, а также сравнительную простоту алгоритма функционирования [2, 3]. Недостатком указанных фильтров является ограниченность класса сигналов, подлежащих обработке, – непериодические сигналы обрабатываются со значитель-

ной погрешностью. Погрешность выражается в искажении формы действующего значения сигнала, его повышенной колебательности, а главное – в значительном увеличении времени установления действующего значения сигнала.

Следует отметить, что процесс цифровой фильтрации всегда является компромиссом между временем установления выходного сигнала (значение амплитуды или действующего значения полезного сигнала) и его достоверностью. Время установления выходного сигнала ЦФ напрямую зависит от длины окна данных, так как после возникновения аварийного режима защищаемой электроустановки в окне данных ЦФ находятся как выборки доаварийного, так и аварийного контролируемого сигналов. В этой связи достоверное значение выходного сигнала может быть получено только за время, требуемое для полного замещения доаварийных выборок контролируемого сигнала аварийными. Поэтому даже при синусоидальном входном сигнале основной частоты и длине окна данных в один период определение его действующего значения с использованием цифровых фильтров на основе ДПФ (в дальнейшем ЦФ Фурье) требует как минимум одного периода промышленной частоты [4].

Основная идея повышения быстродействия ЦФ Фурье в переходном режиме установления выходного сигнала заключается в формировании эквивалентных ОС входного сигнала x_{eqs} , x_{eqc} . Указанные ОС являются функцией текущего значения нелинейного корректирующего коэффициента k_{kn} и ОС сигнала основной частоты x_c , x_s , выделяемых с помощью ЦФ Фурье. Скорость изменения эквивалентных ОС в переходных режимах определяется характером изменения нелинейного корректирующего коэффициента. Для формирования последнего необходимо иметь две переходные характеристики (ПХ), причем они не должны пересекаться.

В [5, 6] предлагается получать указанные характеристики с использованием двух ЦФ: первого, выделяющего действующее значение основной гармоники входного сигнала с помощью цифрового фильтра Фурье, и второго, формирующего действующее значение входного сигнала дополнительным ЦФ.

Проведенные многочисленные исследования [7] позволили определить оптимальную структуру нелинейного корректирующего коэффициента k_{kn} как отношение квадратов действующих значений входного сигнала к сигналу основной гармоники, что повысило быстродействие ЦФ в 1,5–2 раза по сравнению с ЦФ Фурье.

В настоящей работе для повышения быстродействия в переходном режиме цифрового фильтра Фурье предлагается отказаться от дополнительного ЦФ действующего значения и определять нелинейный корректирующий коэффициент, а также ОС эквивалентного сигнала с использованием непосредственно ЦФ Фурье.

Основная часть

В переходном режиме переходная характеристика ЦФ Фурье оказывается существенно нелинейной. Поэтому на первом этапе ее необходимо

спрямить и приблизить к линейной. Затем из этой характеристики путем ее задержки на несколько отсчетов сформировать вторую переходную характеристику. Найдя на каждом шаге расчета отношение первой характеристики ко второй, получают базовый корректирующий коэффициент k_0 , из которого, используя при необходимости дополнительные нелинейные преобразования, формируют корректирующий коэффициент k_{kn} . Этапы его формирования рассматриваются ниже.

1. Цифровым фильтром на основе ДПФ осуществляется выделение косинусной x_{cn} и синусной x_{sn} ОС основной гармоник по выражениям [8]:

$$\begin{aligned} x_{cn} &= \sum_{n=1}^N a_{cn} \cdot x_{вх}(n); \\ x_{sn} &= \sum_{n=1}^N a_{sn} \cdot x_{вх}(n), \end{aligned} \quad (1)$$

где $n = 1, \dots, N$ – целое число, соответствующее номеру выборки входного сигнала; $x_{вх}(n)$ – выборки входного сигнала; N – число выборок сигнала в окне наблюдения; a_{cn} , a_{sn} – коэффициенты соответственно косинусного и синусного ЦФ, которые определяются как:

$$\begin{aligned} a_{cn} &= \frac{2}{N} \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right); \\ a_{sn} &= \frac{2}{N} \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right). \end{aligned} \quad (2)$$

2. Определяются амплитуды X_{mn} ортогональных сигналов по текущим x_n и предыдущим $x_{(n-1)}$ выборкам [9], зафиксированным через шаг дискретизации $\Delta t = T/N$, где T – период сигнала основной частоты:

$$X_{mn} = \frac{\sqrt{x_n^2 - 2x_n x_{(n-1)} \cos \frac{2\pi}{N} + x_{(n-1)}^2}}{\sin \frac{2\pi}{N}}. \quad (3)$$

Подставляя поочередно в (3) выборки синусного (x_{sn} , $x_{s(n-1)}$) и косинусного (x_{cn} , $x_{c(n-1)}$) сигналов, определяют соответственно их амплитуды X_{msn} (кривая 1 на рис. 1) и X_{mcn} (кривая 2 на рис. 1).

3. Вычисляется среднее квадратичное значение амплитуд сигналов X_{mncp} (кривая 3 на рис. 1) [10]

$$X_{mncp} = \sqrt{\frac{X_{msn}^2 + X_{mcn}^2}{2}}. \quad (4)$$

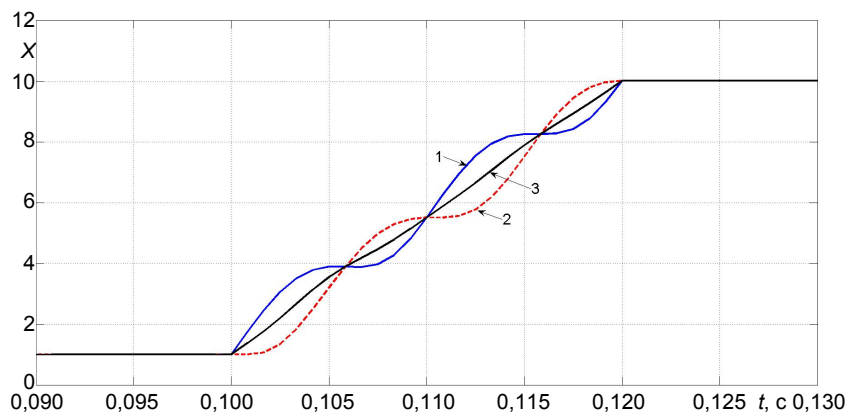


Рис. 1. Амплитуды синусного (1), косинусного (2) и усредненного (3) сигналов в переходном режиме

Fig. 1. The amplitudes of the sine (1), cosine (2) and averaged (3) signals in the transient mode

Значения сигналов и коэффициентов по оси ординат на текущем и всех последующих графиках, если не указано иное, приведены в относительных единицах.

Окончательно усредненная амплитуда определяется по выражению

$$X_{mncp} = \frac{\sqrt{X_{mn}^2 + X_{m(n-1)}^2 - 2 \cos \frac{2\pi}{N} (x_{sn} x_{s(n-1)} + x_{cn} x_{c(n-1)})}}{\sqrt{2} \sin \frac{2\pi}{N}}, \quad (5)$$

где X_{mn}^2 , $X_{m(n-1)}^2$ – квадраты амплитуд текущего и задержанного на 1 шаг Δt дискретизации сигналов, определенных по выражениям:

$$X_{mn}^2 = x_{cn}^2 + x_{sn}^2; \quad X_{m(n-1)}^2 = x_{c(n-1)}^2 + x_{s(n-1)}^2. \quad (6)$$

4. Второй сигнал формируется из первого путем его задержки на z отсчетов. Среднеквадратичная амплитуда задержанного сигнала определяется по аналогии с амплитудой исходного сигнала по выражению, аналогичному (5), в котором используются переменные, задержанные на z отсчетов:

$$X_{mzncp} = \frac{\sqrt{X_{mzn}^2 + X_{mz(n-1)}^2 - 2 \cos \frac{2\pi}{N} (x_{szn} x_{sz(n-1)} + x_{czn} x_{cz(n-1)})}}{\sqrt{2} \sin \frac{2\pi}{N}}. \quad (7)$$

Полученные характеристики X_{mncp} и X_{mzncp} в переходной области по форме близки к наклонным прямым линиям, поэтому их поведение можно исследовать на линейной модели.

5. Базовый коэффициент определяется как

$$k_0 = \frac{X_{m\text{ср}}}{X_{mz\text{ср}}} . \quad (8)$$

После подстановки в (8) выражений (5) и (7) имеем

$$k_0 = \sqrt{\frac{X_{mn}^2 + X_{m(n-1)}^2 - 2 \cos \frac{2\pi}{N} (x_{sn} x_{s(n-1)} + x_{cn} x_{c(n-1)})}{X_{mzn}^2 + X_{mz(n-1)}^2 - 2 \cos \frac{2\pi}{N} (x_{szn} x_{sz(n-1)} + x_{czn} x_{cz(n-1)})}} . \quad (9)$$

Если форма и уровень базового коэффициента оказываются приемлемыми, то $k_{kn} = k_0$, в противном случае коэффициент k_0 дополнительно преобразовывают (возводят в степень, инвертируют и т. п.) для получения корректирующего коэффициента $k_{kn} = f(k_0)$.

4. Вычисление ОС эквивалентных сигналов производится по значениям x_{cn} , x_{sn} и k_{kn} :

$$\begin{aligned} x_{eqcn} &= k_{kn} \cdot x_{cn}; \\ x_{eqsn} &= k_{kn} \cdot x_{sn}. \end{aligned} \quad (10)$$

Линейная модель переходной характеристики. Спрявленную переходную характеристику (ПХ) на участке подъема (рис. 2) с достаточной степенью точности можно аппроксимировать линией (прямая 1) вида $x = kt$, где $k = \text{tg}\alpha = X_m/T$, X_m – амплитуда сигнала в установившемся режиме, $T = 0,02$ с – период сигнала основной частоты.

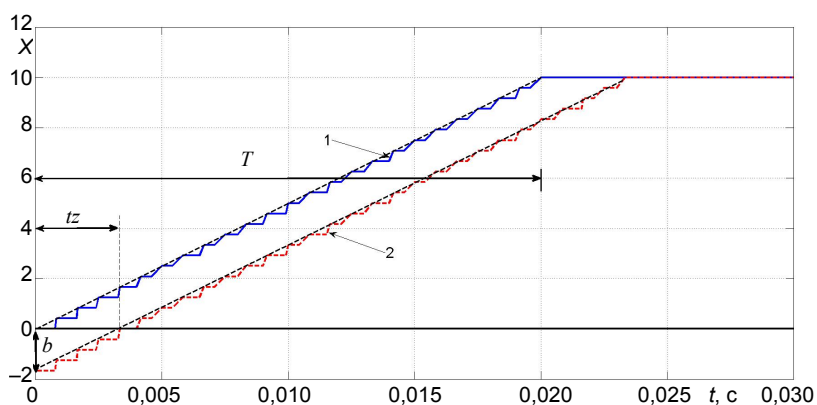


Рис. 2. Линейная переходная характеристика

Fig. 2. Linear transient response

Вторая прямая на рис. 2 – виртуальная. Она получается из первой путем ее сдвига на z отсчетов и описывается уравнением $x_z = kt - b$, при этом время сдвига $t_z = \frac{T}{N} z = \Delta t \cdot z$ пропорционально числу отсчетов z .

Базовый корректирующий коэффициент определяется как

$$k_0 = \frac{x}{x_z} = \frac{kt}{kt - b}, \quad (11)$$

где $b = \frac{X_m}{N} z$ – сдвиг прямой 2 на рис. 1 по оси ординат.

Разделив на k числитель и знаменатель выражения (11) и учитывая, что $\frac{b}{k} = \frac{T \cdot z}{N} = \Delta t \cdot z = t_z$, окончательно базовый корректирующий коэффициент k_0 определяется как

$$k_0 = \frac{t}{t - \Delta t \cdot z}. \quad (12)$$

Важной величиной является значение базового корректирующего коэффициента k_0 в конце периода наблюдения переходного процесса T . К этому моменту выходной сигнал (прямая 1) установится на уровне максимального значения $x = X_m$, а сдвинутый (прямая 2) будет меньше максимального $x_z < X_m$. Поэтому их отношение в течение времени $T + t_z$ будет больше 1, что приведет к появлению перерегулирования.

Подставляя в (12) $t = T$, получим значение базового коэффициента в конце периода наблюдения

$$k_{0r} = \frac{N}{N - z}. \quad (13)$$

Таким образом, уровень перерегулирования зависит от числа выборок сигнала за период N и числа отсчетов z , на которое задерживается сигнал, причем увеличение z приводит к повышению k_{0r} .

Максимальное значение базового коэффициента $k_{0\max}$ определяется в промежутке времени $t = (t_z + \Delta t) \div T$ из (12) при подстановке в него $t = (z+1)\Delta t$ (так как при $t = z\Delta t$ знаменатель выражения (12) обращается в 0):

$$k_{0\max} = z + 1. \quad (14)$$

В качестве примера по выражению (11) для значений $X_m = 10$, $\Delta t = T/N = 0,02/24 = 8,33 \cdot 10^{-4}$ с и $z = 4$ построена кривая изменения базового корректирующего коэффициента k_0 на отрезке времени $t = 0-0,03$ с (рис. 3). Для этих же значений по выражениям (13)–(14) были определены значения коэффициентов $k_{0r} = \frac{24}{24-4} = 1,2$ и $k_{0\max} = 4+1=5$, что в точности совпадает с результатами рис. 3.

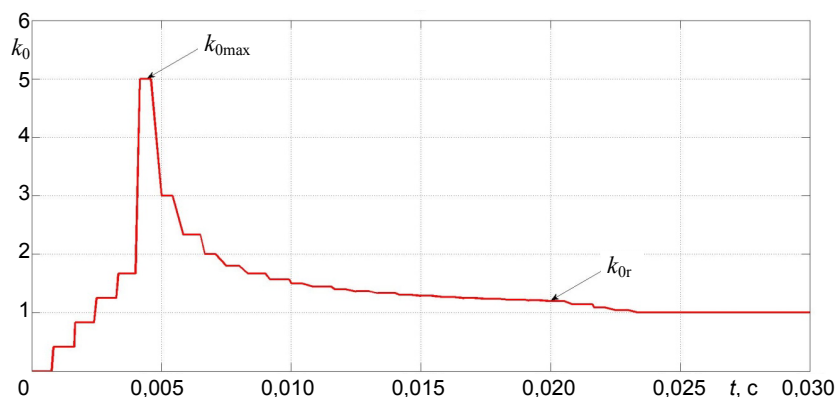


Рис. 3. Изменение базового корректирующего коэффициента k_0

Fig. 3. Change in the basic correction factor k_0

Снижение уровня перерегулирования. Как видно из рис. 2, величина k_0 в промежутке времени $t = 0,02–0,023$ с будет оставаться большей 1, что свидетельствует о перерегулировании на этом временном отрезке. Существенное уменьшение перерегулирования за пределами окна наблюдения длительностью T достигается путем наклона характеристики 2 (рис. 4) так, чтобы к концу переходного процесса она совпала с характеристикой 1.

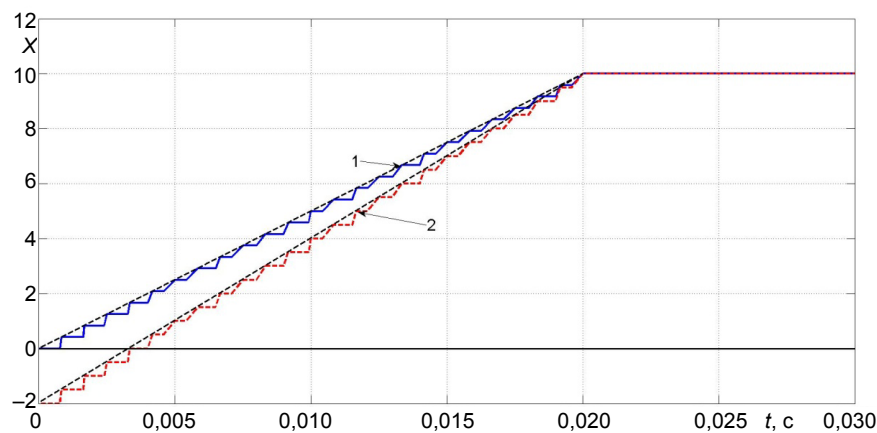


Рис. 4. Переходные характеристики

Fig. 4. Transient characteristics

Для этого все значения характеристики 2 умножаются на константу $l > 1$, а корректирующий коэффициент k_{0l} с учетом указанной константы определяется как

$$k_{0l} = \frac{kt}{(kt - b)l} = \frac{t}{(t - \Delta t \cdot z)l} = \frac{k_0}{l}, \quad (15)$$

где k_0 – базовый корректирующий коэффициент усиления.

При этом соответствующие значения коэффициентов (13) и (14) при наклоне ПХ принимают следующий вид:

$$k_{0l} = \frac{N}{(N-z)l}; \quad (16)$$

$$k_{0l\max} = \frac{z+1}{l}. \quad (17)$$

Условие отсутствия перерегулирования выполняется при подстановке $k_{0l} = 1$ в (16), откуда определяется величина l , при которой это условие выполняется

$$l = \frac{N}{N-z}. \quad (18)$$

На рис. 5 приведены графики изменения во времени значений коэффициентов k_{0l} , построенные согласно выражению (15), в сравнении с базовым графиком корректирующего коэффициента усиления k_0 (пунктирная кривая), построенным по (12). Из рисунка видно, что к моменту окончания переходного процесса $k_{0l} = 1$, что свидетельствует о полной компенсации перерегулирования.

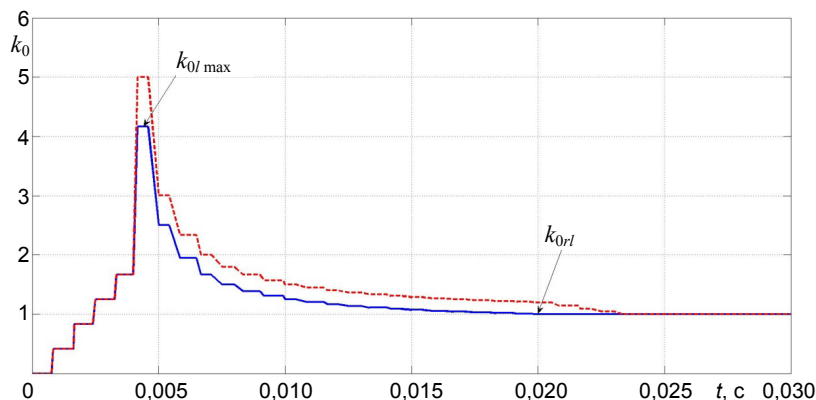


Рис. 5. Изменение базового коэффициента k_{0l} в сравнении с k_0

Fig. 5. Change in the basic coefficient k_{0l} as compared with k_0

Определение оптимального корректирующего коэффициента. В [7] изложены и детально исследованы методы определения корректирующих коэффициентов. Анализ полученных результатов показывает, что наибольшей универсальностью при относительной простоте реализации обладает корректирующий коэффициент, определяемый на основе двух ЦФ. Первый из них, являющийся ЦФ на основе ДПФ, обеспечивает вычисление амплитуды основной гармоники входного сигнала X_{mn} , а с помощью дополнительного ЦФ определяют выборки амплитудных значений входного сигнала $X_{вхл}$. Отличительной особенностью указанного коэффициента

является приемлемая степень коррекции амплитудной динамической погрешности, обусловленной не только инерционностью фильтра, но и насыщением стали магнитопровода трансформатора тока (ТТ).

Для получения оптимального корректирующего коэффициента находят отношение квадратов указанных сигналов

$$k_{ky} = \frac{X_{вхл}^2}{X_{mn}^2}, \quad (19)$$

где $X_{mn}^2 = x_{cn}^2 + x_{sn}^2$ – сумма квадратов косинусной x_{cn} и синусной x_{sn} ОС основной гармоники,

$$X_{вхл}^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_{вх}^2(n).$$

В результате проведенных исследований предложено выражение для корректирующего коэффициента $k_{kn} = f(k_0)$, позволяющее с достаточной степенью точности аппроксимировать оптимальный коэффициент k_{ky} :

$$k_{kn} = \left(\frac{k_0}{l} \right)^m = \left(\frac{X_{mncp}}{X_{mzncp} l} \right)^m. \quad (20)$$

Организация и проведение вычислительного эксперимента. Оценка эффективности предлагаемого метода формирования ОС входных сигналов с ускоренным функционированием в переходном режиме проводилась с использованием цифровой модели (рис. 6), выполненной в среде динамического моделирования MATLAB-Simulink [11].

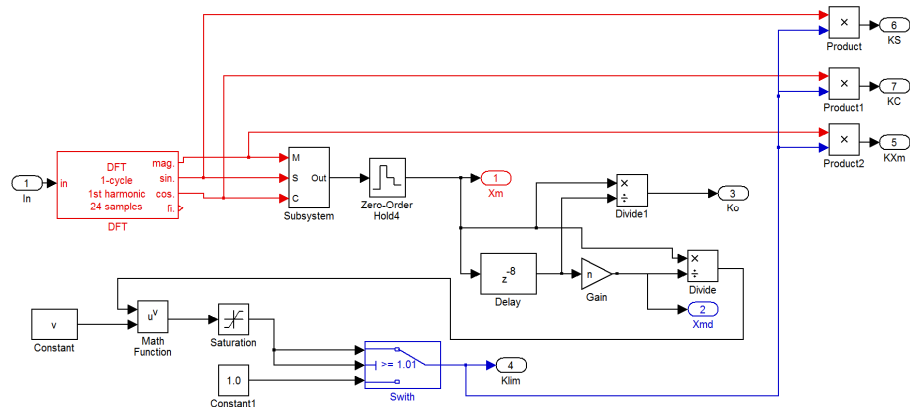


Рис. 6. Структура модели

Fig. 6. The structure of the model

В указанную структуру входят модели источника входного сигнала (вход *in*), ЦФ Фурье (*DFT*), подсистемы *Subsystem*, в которой реализовано выражение (5) усредненной амплитуды сигнала X_m , блока *Delay*, в котором

формируется задержка z , а также библиотечные блоки Simulink, обеспечивающие реализацию предлагаемого метода. Выходными параметрами модели являются значения ОС эквивалентного сигнала x_{eqsn} , x_{eqcn} , амплитуда выходного X_m и сдвинутого X_{md} сигналов, а также корректирующие коэффициенты k_{kn} и k_0 .

Результаты исследования. Исследование работоспособности и эффективности предложенного метода производилось при различных тестовых воздействиях. Все результаты, полученные в ходе моделирования разработанного ЦФ Фурье с ускоренным функционированием в переходном режиме (ЦФФУ), сравнивались с аналогичными параметрами исходного ЦФ Фурье, который используется в большинстве измерительных органов микропроцессорных защит.

Полученные из линейной модели расчетные выражения могут, в первом приближении, использоваться и для настройки параметров реальных ЦФ Фурье. Так, принимая $N = 24$, $z = 8$, по выражению (18) определяется параметр $l = 1,5$, при котором на ПХ теоретически отсутствует перерегулирование (экспериментально установлено $l = 1,45$). Задаваясь по аналогии с (19) значением $m = 2$, получим из (20) выражение для корректирующего коэффициента $k_{kn} = \left(\frac{k_0}{1,5}\right)^2$, которое, как было установлено проведенными

расчетами, целесообразно ограничить величиной $k_{k\max} = k_{kn} = 1,65$.

На рис. 7 представлен рассчитанный по формуле (20) с использованием приведенных выше данных корректирующий коэффициент $k_{kn} = f(k_0)$ (кривая 2) в сравнении с определенным по выражению (19) и также реализованным в MATLAB-Simulink оптимальным коэффициентом k_{ky} (кривая 1).

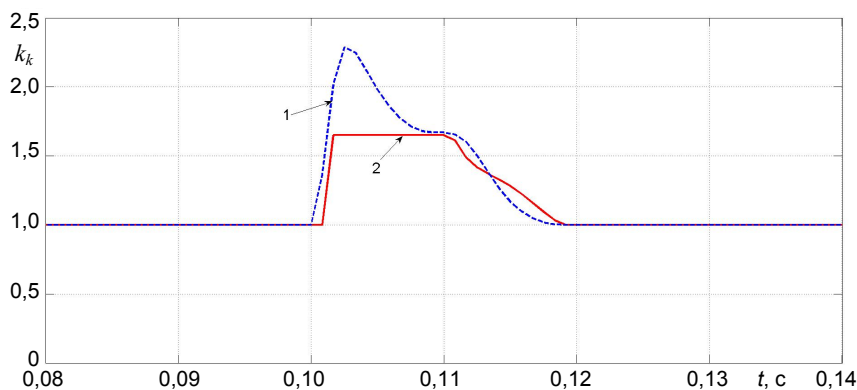


Рис. 7. Корректирующие коэффициенты: 1 – k_{ky} ; 2 – $k_{kn} = f(k_0)$

Fig. 7. Correction factors: 1 – k_{ky} ; 2 – $k_{kn} = f(k_0)$

На рис. 8 приведены переходные характеристики предлагаемого ЦФФУ (кривая 1), ЦФ Фурье (кривая 3) и ЦФ на основе оптимального коэффициента k_{ky} (кривая 2) при гармоническом входном воздействии (кривая 4). Для этого по выражениям (10) были определены ОС сигналов для соответ-

ствующих корректирующих коэффициентов, а по ним – амплитудные значения эквивалентных сигналов:

$$X_{meqn} = \sqrt{x_{eqcn}^2 + x_{eqsn}^2}. \quad (21)$$

Как видно из рисунка, переходная характеристика ЦФФУ, обладая лучшей динамикой по сравнению с ПХ ЦФ Фурье, имеет незначительные перерегулирование и колебательность. Указанные параметры не выходят за допустимые общепринятые показатели качества переходного процесса (перерегулирование – до 20 % и число колебаний – до двух) [12], а переходные характеристики ЦФФУ и ЦФ на основе оптимального корректирующего коэффициента практически совпадают.

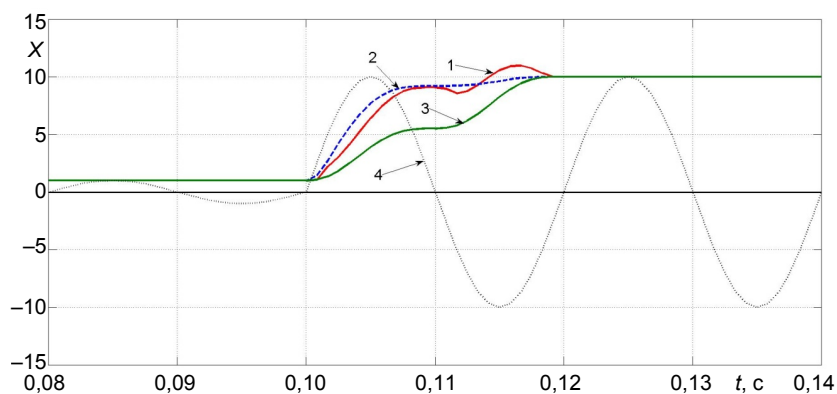


Рис. 8. Переходные характеристики цифровых фильтров
Fig. 8. Transient characteristics of digital filters

На рис. 9 представлены графики (φ_n, X_{meqn}) и (φ_n, X_{mn}) в полярной системе координат [13] для аварийного переходного режима. Угол изменяется одинаково для обоих ЦФ и определяется согласно выражению

$$\varphi_n = \arctg \frac{x_{cn}}{x_{sn}}. \quad (22)$$

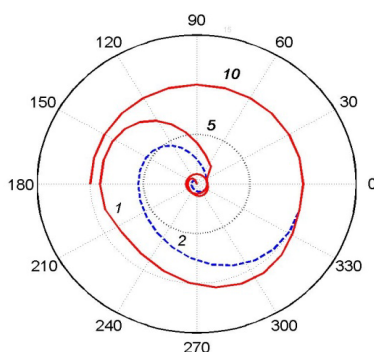


Рис. 9. Траектории рабочих точек цифровых фильтров
Fig. 9. Trajectories of working points of digital filters

Траектория рабочей точки ЦФФУ (кривая 1) по сравнению с траекторией ЦФ Фурье (кривая 2) быстрее приближается к установившемуся значению, но, как и на рис 8, сопровождается колебаниями (отсутствующими у ЦФ Фурье) ближе к окончанию переходного процесса.

Реакция обоих ЦФ на входной сигнал с аperiodической составляющей вида $x(t) = 10\sin(2\pi 50t) + 3e^{-0,03t}$ приведена на рис. 10. При указанных выше параметрах расчета у предлагаемого фильтра в переходном режиме (кривая 1) наблюдается существенное повышение динамики функционирования (при незначительном перерегулировании) по сравнению с фильтром Фурье (кривая 2).

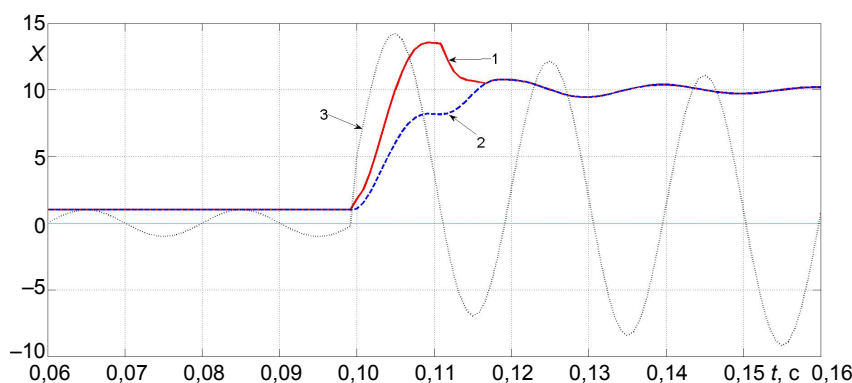


Рис. 10. Воздействие с аperiodической составляющей:

- 1 – цифровой фильтр Фурье с ускоренным функционированием в переходном режиме;
2 – цифровой фильтр Фурье; 3 – входной сигнал

Fig. 10. Influence with an aperiodic component:

- 1 – digital Fourier filter with accelerated operation in a transient mode;
2 – digital Fourier filter; 3 – input signal

Для проверки правильности выделения амплитуды сигнала основной гармоники (рис. 11) из незатухающего гармонического воздействия использовался сигнал (кривая 3) вида $x(t) = 10\sin(2\pi 50t) + 5\sin(2\pi 100t) + 3\sin(2\pi 150t) + 2\sin(2\pi 250t)$. Так же как и ЦФ Фурье (кривая 2), ЦФФУ (кривая 1) за время, равное длительности одного периода основной частоты, выделяет амплитуду основной гармоники из сильно зашумленного сигнала.

На рис. 12 приведены результаты расчетов с использованием входного воздействия, приближенного к реальному вторичному току измерительного ТТ, которое получено с помощью комплексной математической модели энергосистемы, реализованной в MATLAB-Simulink-SimPowerSystems [14].

В промежутке времени $t = 0,00-0,10$ с моделируется нормальный режим, а в момент времени $t = 0,10$ с наступает аварийный режим, при котором форма вторичного тока ТТ искажается (кривая 3). При этом время нарастания выходных сигналов в переходном режиме существенно разли-

чается: у предлагаемого ЦФФУ выходной сигнал нарастает быстрее (кривая 1) выходного сигнала ЦФ Фурье (кривая 2). Если принять, например, уровень срабатывания $X_{\text{ср}} = 150$ А, то ЦФФУ достигает его на полпериода быстрее, чем стандартный ЦФ Фурье.

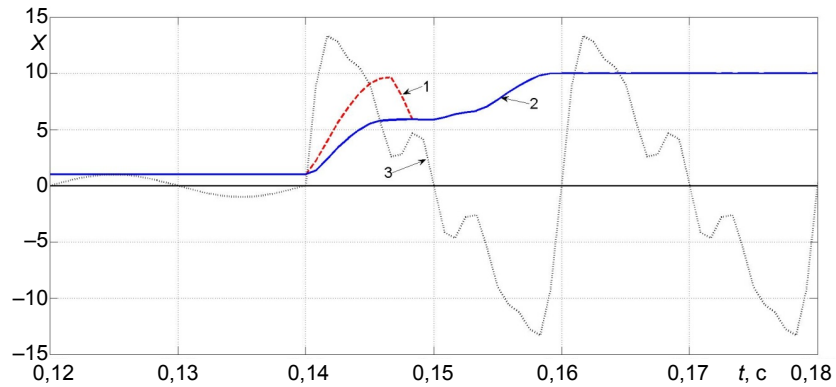


Рис. 11. Воздействие с высшими гармониками: 1 – цифровой фильтр Фурье с ускоренным функционированием в переходном режиме; 2 – цифровой фильтр Фурье; 3 – входной сигнал

Fig. 11. Influence with higher harmonics: 1 – digital Fourier filter with accelerated operation in a transient mode; 2 – digital Fourier filter; 3 – input signal

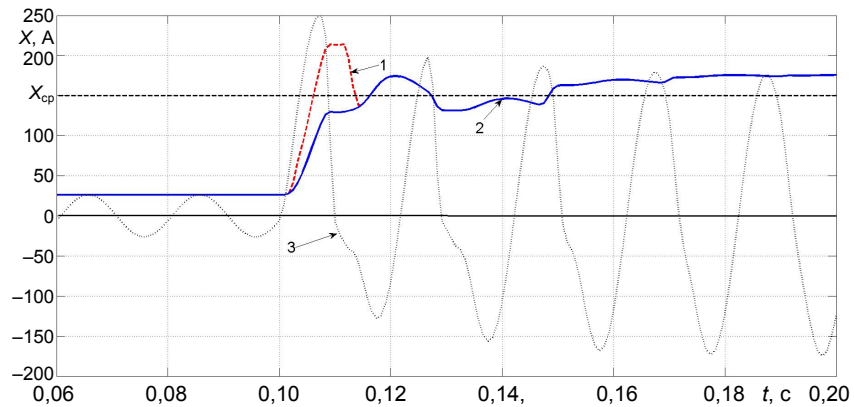


Рис. 12. Сложное воздействие: 1 – цифровой фильтр Фурье с ускоренным функционированием в переходном режиме; 2 – цифровой фильтр Фурье; 3 – входной сигнал

Fig. 12. Complex influence: 1 – digital Fourier filter with accelerated operation in a transient mode; 2 – digital Fourier filter; 3 – input signal

ВЫВОДЫ

1. Предложенная методика построения цифрового фильтра на основе дискретного преобразования Фурье обеспечивает повышение его быстродействия в переходных режимах установления выходного сигнала.

2. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что разработанный цифровой фильтр имеет быстродействие не менее чем в полтора раза выше по сравнению с известным фильтром Фурье, что достигается только за счет совершенствования его алгоритма функционирования без использования дополнительных аппаратных средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
2. Ванин, В. К. Релейная защита на элементах вычислительной техники / В. К. Ванин, Г. М. Павлов. М.: Энергоатомиздат, 1991. 336 с.
3. Wu, Q. H. Protective Relaying of Power Systems Using Mathematical Morphology / Q. H. Wu, Z. Lu, T. Y. Ji. London: Springer, 2009. 224 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-499-7>.
4. Schweitzer III, E. O. Filtering for Protective Relays / E. O. Schweitzer III, D. Hou // WESCANEX 93. Communications, Computers and Power in the Modern Environment. Conference Proceedings. IEEE. 1993. P. 15–23. <https://doi.org/10.1109/wescan.1993.270548>.
5. Методика повышения быстродействия измерительных органов микропроцессорных защит электроустановок / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 5. С. 403–412. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412>.
6. Формирование ортогональных составляющих входных сигналов в микропроцессорных защитах / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев, В. С. Каченя // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 4. С. 328–339. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-328-339>.
7. Румянцев, Ю. В. Формирование информационных составляющих входных величин в цифровых органах релейной защиты / Ю. В. Румянцев, В. Ю. Румянцев, Ф. А. Романюк. Минск: БНТУ, 2024. 175 с.
8. Oliveira, N. L. S. Effects of the Exponentially Decaying DC Offset in the Phasor Estimation Algorithms Performance / N. L. S. Oliveira, B. A. Souza // Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA). 2012. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/tcdla.2012.6319090>.
9. Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты / Ю. В. Румянцев, Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, И. В. Новаш // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 5. С. 397–417. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417>.
10. Большой энциклопедический словарь / гл. ред. А. М. Прохоров. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Большая Российская энциклопедия; СПб.: Норинт, 2000. 1434 с.
11. Дэбни, Дж. Simulink 4. Секреты мастерства / Дж. Дэбни, Т. Харман; пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. 403 с.
12. Теория автоматического управления: учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика»: в 2 ч. / Н. А. Бабаков, А. А. Воронов, А. А. Воронова [и др.]; под ред. А. А. Воронова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1986. Ч. I: Теория линейных систем автоматического управления. 367 с.
13. Гилат, А. MATLAB. Теория и практика / А. Гилат; пер. с англ. М.: ДМК Пресс, 2016. 416 с.
14. Испытания микропроцессорных токовых защит: теория, моделирование, практика / И. В. Новаш, Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев. Минск: БНТУ, 2021. 168 с.

REFERENCES

1. Schneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
2. Vanin V. K., Pavlov G. M. *Relay Protection on Computer Hardware Elements*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 336 (in Russian).
3. Wu Q. H., Lu Z., Ji T. Y. (2009) *Protective Relaying of Power Systems Using Mathematical Morphology*. London, Springer, 2009. 224 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-499-7>.
4. Schweitzer III E. O., Hou D. (1993) Filtering for Protective Relays. *WESCANEX 93. Communications, Computers and Power in the Modern Environment. Conference Proceedings*. IEEE, 15–23. <https://doi.org/10.1109/wescan.1993.270548>.
5. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. A., Rumiantsev Yu. V. (2019) Technique of Performance Improvement of the Microprocessor-Based Protection Measuring Element. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (5), 403–412. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412> (in Russian).
6. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Kachenya V. S. (2020) Orthogonal Components Forming of the Microprocessor-Based Protection Input Signals. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (4), 328–339. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-328-339> (in Russian).
7. Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Romaniuk F. A. (2024) *Formation of Information Components of Input Quantities in Digital Relay Protection Devices*. Minsk, BNTU. 175 (in Russian).
8. Oliveira N. L. S., de Souza B. A. (2012) Effects of the Exponentially Decaying DC Offset in the Phasor Estimation Algorithms Performance. *2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA)*, Montevideo, Uruguay, 2012. <https://doi.org/10.1109/tdc-la.2012.6319090> +*/9. Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2016) Digital+ Filters Implementation in Microprocessor-based Relay Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (5), 397–417. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417> (in Russian).
10. Prokhorov A. M. (ed.) (2000) *The Great Encyclopedic Dictionary*. 2nd ed. Moscow, Bol'shaya Rossiiskaya Entsiklopediya Publ.; St. Petersburg, Norint Publ., 2000. 1434 p. (in Russian).
11. Dabney J., Harman T. (2003) *Simulink 4. Mastering Secrets*. Moscow, BINOM Publ. 403 (in Russian).
12. Babakov N. A., Voronov A. A., Voronova A. A., Diduk G. A., Dmitrieva N. D., Kim D. P., Benski B. M., Popovich P. N. (1986) *Theory of Automatic Control. Part I: Theory of Linear Automatic Control Systems*. 2nd ed. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 367 (in Russian).
13. Gilat A. (2011) *MATLAB. An Introduction with Applications*. 4th ed. Wiley. 418.
14. Novash I. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V. (2021) *Testing of Microprocessor Current Protections: Theory, Modeling, Practice*. Minsk, BNTU. 168 (in Russian).

Received: 19 December 2025

Accepted: 20 February 2025

Published online: 30 May 2025

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-209-229>

УДК 53 (075.3)

Вольт-амперные характеристики выпрямительных диодов металл – полупроводник

Часть 1

Формирование токов проводимости и токов смещения на $p-n$ переходе

Л. И. Гречихин¹⁾

¹⁾УО «Белорусская государственная академия связи» (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Электрические токи, возникающие в контакте металл – полупроводник, представляют в виде суммы токов диффузии и токов дрейфа. Для определения их величины предлагались разные эмпирические формулы. Такой подход определения электрических токов в диодах металл – полупроводник не позволяет получать экспериментально определенные величины электрических токов. В этой связи возникла проблема в разработке теоретических основ производства такого вида техники на достаточно обоснованной теоретической базе с учетом последних достижений в электротехнике и электронике. Теоретически рассчитанная поверхность из трехатомных молекул для кремния полностью совпала с экспериментальными данными, полученными на туннельном микроскопе. Рассмотрен процесс нанесения пленки из полупроводника германия или кремния на основу металла – алюминия. Показано, что наиболее оптимальным является нанесение покрытий методом лазерного распыления. Определена концентрация свободных электронов в зоне проводимости алюминия, которая возникает вследствие ионизации отрицательных ионов и термоавтоэлектронной эмиссии электронов из металла под действием температуры и приложенного внешнего напряжения. Разработана теория формирования электрических токов проводимости и смещения. Установлены условия возникновения электрического тока проводимости в столбообразных пустотах на поверхности алюминия и токов смещения в подводящих проводах. Показано, каким образом происходит превращение токов проводимости в ток смещения на границе $p-n$ перехода.

Ключевые слова: диод, стабилитрон, ток проводимости, ток смещения, термоавтоэлектронная эмиссия, энергия сродства, работа выхода

Для цитирования: Гречихин, Л. И. Вольт-амперные характеристики выпрямительных диодов металл – полупроводник. Ч. 1: Формирование токов проводимости и токов смещения на $p-n$ переходе / Л. И. Гречихин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 3. С. 209–229. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-68-3-209-229>

Volt-ampere Characteristics of Metal-semiconductor Rectifier Diodes

Part 1

Formation of Conduction Currents and Displacement Currents at the $p-n$ Junction

L. I. Gretchikhin¹⁾

¹⁾Educational Institution “Belarusian State Academy of Communication”

Abstract. Electric currents arising in metal-semiconductor contact are represented as the sum of diffusion currents and drift currents. The use of various empirical formulas was proposed to de-

Адрес для переписки

Гречихин Леонид Иванович
УО «Белорусская государственная
академия связи»
ул. Уборевича, 77,
220096, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 378-46-44
gretchihin@yandex.ru

Address for correspondence

Gretchikhin Leonid I.
Educational Institution “Belarusian State
Academy of Communication”
77 Uborevich str.,
220096, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 378-46-44
gretchihin@yandex.ru

termine their value. This approach to determining electric currents in metal-semiconductor diodes does not allow pinpointing experimentally obtained values of electric currents. In this regard, there was a problem in developing the theoretical foundations for the production of this type of equipment on a sufficiently sound theoretical basis, taking into account the latest achievements in electrical engineering and electronics. The theoretically calculated surface of triatomic molecules for silicon completely coincided with the experimental data obtained on a tunneling microscope. The process of applying a film made of germanium or silicon semiconductor to an aluminum metal base is considered. It is shown that the most optimal is the application of coatings by laser spraying. The concentration of free electrons in the conduction band of aluminum is determined, which occurs due to the ionization of negative ions and thermoautoelectronic emission of electrons from the metal under the influence of temperature and applied external voltage. A theory of the formation of electric currents of conduction and displacement has been developed. The conditions for the occurrence of an electric conduction current in columnar cavities on the aluminum surface and displacement currents in the supply wires are specified. It is shown how the conversion of conduction currents into a displacement current occurs at the boundary of the p - n junction.

Keywords: diode, zener diode, conduction current, displacement current, thermoautoelectronic emission, affinity energy, output operation

For citation: Gretchikhin L. I. (2025) Volt-ampere Characteristics of Metal-semiconductor Rectifier Diodes. Part 1: Formation of Conduction Currents and Displacement Currents at the p - n Junction. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (3), 209–229. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-209-229> (in Russian)

Введение

В выпрямительных диодах и стабилитронах используется контакт металл – полупроводник. В качестве металла применяется алюминий, а в качестве полупроводников – германий или кремний. В такой комбинации полагают [1–3], что реализуется p - n переход, область контакта полупроводника с металлом у катода является p -проводимостью, а у анода – n -проводимостью. Общий электрический ток при этом определяется суммой четырех слагаемых [3]

$$I_{p-n} = I_{n, \text{диф}} + I_{p, \text{диф}} - I_{n, \text{др}} - I_{p, \text{др}}, \quad (1)$$

где $I_{n, \text{диф}}$ – электронный ток диффузии; $I_{p, \text{диф}}$ – дырочный ток диффузии; $I_{n, \text{др}}$ – электронный ток дрейфа; $I_{p, \text{др}}$ – дырочный ток дрейфа.

Максвелл, анализируя законы электромагнетизма, полученные опытным путем, представил их математически в обобщенном виде. На этой основе стало ясно, что в природе существует только два вида электрических токов – ток проводимости и ток смещения. Оба этих токов переносят энергию. Механизм переноса энергии этими токами разный. В токе проводимости перенос энергии определяется движением свободных электрических зарядов, а в токе смещения – изменением электрического поля, т. е. вектором Умова–Пойнтинга [4]. Поэтому электронный ток диффузии и дырочный ток дрейфа следует рассматривать как ток проводимости, в котором процесс получения свободных электронов и их скорости движения могут быть разными.

В процессе анализа работы диода Ганна [5] рассматривался электронный ток проводимости по внешней поверхности толстостенного полупроводника. В этом случае подвижность определялась скоростью, которая

возникает в пустотах между поверхностными кластерами непосредственно у контакта металл – полупроводник. Когда на туннельном микроскопе были получены поверхности твердых тел [6], это позволило в работах [7–9] показать, что p - и n -проводимости* в полупроводниках возникают вследствие ионизации отрицательных ионов атомов легированного полупроводника.

Полученные экспериментально величины электрических токов пытались аппроксимировать разными функциями, т. е. создавались эмпирические зависимости. Полученные эмпирические зависимости, как правило, не отражают реально получаемые электрические токи. Поэтому их анализировать не следует.

В общем случае электрический ток для движущихся свободных электронов определяется по формуле [10]

$$I = en_e v_e S, \quad (2)$$

где e – заряд электрона; n_e – концентрация свободных электронов; v_e – подвижность электронов; S – площадь сечения, через которую движутся свободные электроны.

Общая площадь электродов, применяемых в электронике, составляет не более 100×100 мкм [1, 2]. Электрический ток, определяемый по формуле (2), Максвелл определил как ток проводимости. Все величины, входящие в (2), кроме заряда электрона, неясно, как определять.

Аналогичная ситуация имеет место и для движения положительно заряженных дырок. Положительно заряженные дырки создаются положительно заряженными ионами кристаллической решетки, которые внутри кристалла покоятся и совершают движение, создавая электрический ток, не в состоянии. Поэтому для положительно заряженных дырок формула (2) не применима в принципе.

Чтобы как-то улучшить ситуацию, рассматривают движение электронов под действием контактной разности потенциалов. Контактная разность потенциалов возникает в контакте между двумя разными кристаллами, а в рассматриваемом случае контакт осуществляется между кристаллом и достаточно тонкой нанопленкой. В таком контакте разность потенциалов неясно, как определять. В контакте металл – полупроводник ситуация более сложная. В этой связи возникла *цель*: рассмотреть контакт металл – полупроводник с позиций образования отрицательных ионов атомов и молекул полупроводника, нанесенного на поверхность металла.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– рассмотреть процесс нанесения пленки полупроводника на основу металла алюминия;

* Терминология сохранена старая, чтобы было понятно, о чем идет речь.

- определить концентрацию свободных электронов в зоне проводимости алюминия в процессе ионизации отрицательных ионов под действием температуры и приложенного внешнего напряжения;
- установить условия возникновения электрического тока проводимости и тока смещения в контакте металл – полупроводник.

Основная часть

Нанесение пленки полупроводника на поверхность алюминия. С помощью туннельного микроскопа доказано, что кристаллы и поверхность кристаллов алюминия, кремния и германия формируются трехатомными молекулами [6]. Конструкция поверхности из трехатомных молекул возникает в кристаллах гранецентрированной и алмазной структур. Теоретический расчет поверхности алмазного кристалла кремния идеально совпал с экспериментально измеренной [10]. Оказалось, что структура поверхности кристалла и его внутренняя структура абсолютно разные. В поверхностном слое кристалла образуются столбообразные пустоты, размер которых для кремния (на основании рис. 1b) $d_p = 3,964 \cdot 10^{-10}$ м несколько больше диаметра молекулы данного материала [11].

Количество трехатомных молекул германия или кремния, которые могут полностью заполнить поверхность кристалла алюминия внутри столбообразной пустоты, составляет ~ 3 . Кристалл алюминия в чистом виде присутствует только внутри столбообразных пустот. В кристалле алюминия положительно заряженные атомы формируют кристаллическую решетку, а внутри такой решетки находятся электроны. Теоретический расчет распределения электронов по энергиям внутри металла алюминия в сравнении с экспериментальными данными выполнен в работе [12]. Для электронов внутри кристалла смещение границы ионизации атомов алюминия относительно нулевого значения энергии составило $\Delta\theta_i = 0,987$ эВ, а смещение уровня Ферми относительно смещенной границы ионизации $E_F = 1,687$ эВ [12]. Это значение энергии является шириной запрещенной зоны для кристалла алюминия.

После образования отрицательных ионов атомов в поверхностном слое кристалла встроенные дипольные электрические моменты примесей при взаимодействии с внешним электрическим полем располагаются нормально к поверхности [13, 14]. Встроенные дипольные электрические моменты отрицательных ионов германия и кремния под воздействием температуры устанавливаются хаотически, а приложенное внешнее электрическое поле выстраивает встроенные диполи нормально к поверхности кристалла. При этом уровень энергии сродства к электрону у германия 1,23 эВ и отстоит от дна зоны проводимости алюминия на удалении 0,243 эВ. Полагают, что отрицательный ион кремния обладает максимальной энергией сродства 1,39 эВ [15]. Экспериментально в работах [10, 14] получено максимальное значение сродства к электрону для кремния $\sim 1,5$ эВ*. Этот уро-

* Термоавтоэлектронную эмиссию с одного атома следует рассматривать как прямой метод измерения сродства к электрону этого атома.

вень энергии отстоит от дна зоны проводимости алюминия на удалении 0,513 эВ. Если величина осаждаемых молекул не превышает размер трехатомных молекул, которые формируют поверхность кристалла алюминия, то атомы примеси в столбообразных пустотах располагаются на поверхности кристалла и непосредственно взаимодействуют с кристаллом.

Размеры радиусов и величины встроенных дипольных электрических моментов осаждаемых веществ, а также основы алюминия приведены в табл. 1. Наиболее точно определены радиусы атомов в структуре кристалла с использованием данных рентгеноструктурного анализа.

Таблица 1

Значения радиусов атомов в кристалле, молекуле и свободных атомах, а также сродство к электрону и встроенного атомного электрического момента в атомах [15, 16]

The values of the radii of atoms in a crystal, in a molecule, and in free atoms, as well as of the electron affinity and the built-in atomic electric moment in atoms [15, 16]

Параметр	Осаждаемые частицы и основа		
	германий	кремний	алюминий
Радиус атома в кристалле, Å	1,390	1,180	1,430
Радиус свободного атома, Å	1,536	1,475	1,817
Радиус молекулы, Å	2,210	2,122	2,614
Сродство к электрону атомов, эВ	1,230	1,500 (1,380)	0,440
Дипольный электрический момент атома, Кл·м ·10 ³⁰	2,618	5,100	3,410
Величина заряда в центре молекулы, Кл·10 ²⁰	1,704	3,458	2,135

Радиусы свободных атомов определены теоретически, и эти значения можно считать достаточно надежными (приведены в справочнике [16]). Наиболее грубо определены радиусы молекул. Например, для кремния из структуры поверхности кристалла кремния, полученной туннельным микроскопом, расстояние между молекулами на поверхности кремния (111) равно ~3,72 Å. Радиус молекулы кремния на основании строения трехатомной молекулы [17] соответствует 2,122 Å, а из строения трехатомной молекулы германия этот радиус равен 2,21 Å. Соответственно радиус трехатомной молекулы алюминия имеет значение 2,614 Å.

Чтобы напылять монослои из трехатомных молекул на поверхность алюминия, которая сформирована трехатомными молекулами, применяют испарение при температуре кипения. В этих условиях на разогретой жидкой поверхности образуются поверхностные кластеры из трехатомных молекул, а также преимущественно присутствуют трехатомные молекулы [10]. В центре каждой трехатомной молекулы возникает нескомпенсированный положительный или отрицательный электрический заряд с вероятностью 0,5 [18]. Нескомпенсированный внутренний заряд в трехатомной молекуле является зарядом, который сформирован во встроенном электрическом диполе каждого атома. Значения этих зарядов приведены в табл. 1. Поверхностные кластеры на жидкой поверхности вблизи температуры ки-

пения друг с другом не контактируются, так как экранируются окружающими трехатомными молекулами, и поэтому они между собой не взаимодействуют и являются свободными. Поэтому вблизи температуры кипения с поверхности испаряются трехатомные молекулы и кластеры из трехатомных молекул в виде «снежинок» [19], а строго при температуре кипения испаряются только трехатомные молекулы. Со временем вследствие испарения температура поверхности уменьшается и на ней начинают образовываться поверхностные кластеры. В этом случае преимущественно испаряются кластеры. Практическая теория температурного испарения разработана в [19]. Подробно процесс испарения индия с осаждением на поверхность кремния детально изучен туннельным микроскопом, и полученные результаты приведены на рис. 1 [5].

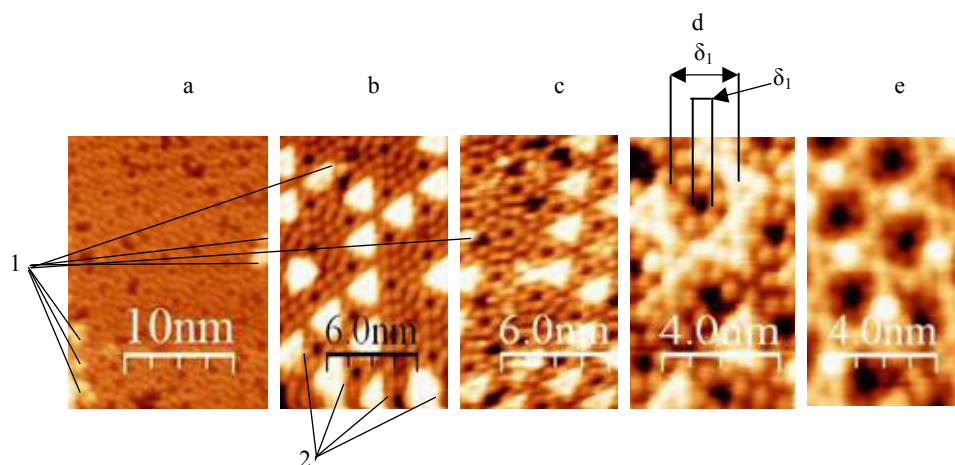


Рис. 1. Последовательность формирования пленки индия на поверхности кремния Si [111]:
а – длительность напыления 2 мин; б – 6 мин; в – 8 мин; д – 15 мин; е – 20 мин;
1 – молекулы; 2 – кластеры

Fig. 1. The sequence of indium film formation on the surface of silicon Si [111]:
a – the duration of spraying is 2 min; b – 6 min; c – 8 min; d – 15 min; e – 20 min;
1 – molecules; 2 – clusters

В начальный момент напыления, когда индий был нагрет строго до температуры кипения, преимущественно испарялись молекулы индия. После двух минут напыления поверхность кремния оказалась практически чистой и достаточно редко осаждались молекулы индия. Практически все молекулы индия были поглощены столбообразными пустотами и дефектами поверхностного слоя кремния. Некоторые молекулы индия в виде кластеров из трех двухатомных молекул осаждались между молекулами, которые формируют столбообразную пустоту, и не проникали внутрь столбообразной пустоты. По мере увеличения времени напыления температура жидкого индия уменьшалась, что приводило к испарению преимущественно кластеров индия. Поток испарения кластеров значительно превосходит поток испарения молекул индия. Это обусловлено тем, что силы поверхностного натяжения для молекул отличны от нуля, а для кластеров равны

нулю. Такая же динамика процесса испарения происходит, когда на алюминий напыляются трехатомные молекулы германия или кремния. В работах [20, 21] установлено, что большинство атомов содержат встроенный дипольный электрический момент. При образовании трехатомных молекул дипольные электрические моменты располагаются так, что в центре молекулы возникает нескомпенсированный электрический заряд разных знаков, т. е. возникает аллотропия [18].

На основании такой аллотропии поверхность твердого тела из трехатомных молекул является знакопеременной. Молекулы на поверхности твердого тела внутри столбообразных пустот взаимодействуют между собой кулоновским и диполь-дипольным взаимодействием своих атомов [18, 19]. С учетом этих видов взаимодействия величина энергии связи атомов германия с ионами кристалла алюминия равна $\sim 5,1$ эВ, а энергия связи атомов кремния с ионами кристаллической решетки алюминия обладает значением $\sim 5,52$ эВ. При таких значительных энергиях связи внутри столбообразных пустот трехатомные молекулы германия или кремния стремятся заполнить эти пустоты в поверхностном слое алюминия с распадом на отдельные атомы. Следующие трехатомные молекулы кремния или германия, наносимые на поверхность алюминия, в столбообразных пустотах будут взаимодействовать с тремя атомами первого монослоя. Такое взаимодействие реализуется преимущественно диполь-дипольным взаимодействием, в случае германия энергия связи составит $\sim 0,018$ эВ, а в случае кремния $\sim 0,0574$ эВ. Такие слабые энергии не позволяют осаждаться в столбообразных пустотах более одного монослоя молекул германия и кремния.

Каждый атом примеси, обладая встроенным дипольным электрическим моментом, взаимодействует с положительными ионами атомов кристаллической решетки. Такая электрон-дипольная связь для атомов кремния на поверхности кристалла алюминия обладает энергией связи $0,544$ эВ, а для атомов германия – $0,268$ эВ. Эти энергии связи удерживают атомы примеси на поверхности алюминия даже после полной ионизации отрицательных ионов.

На поверхность вокруг столбообразной пустоты трехатомные молекулы германия или кремния будут осаждаться на свой антипод в поверхностном слое алюминия. Энергия связи молекул германия при осаждении вокруг столбообразной пустоты составляет $0,0595$ эВ, а молекул кремния $0,121$ эВ. Энергия связи молекул германия и кремния в столбообразных пустотах в два и даже в три раза меньше, чем на внешней поверхности вокруг столбообразных пустот. При такой значительной разности энергий связи последующие напыляемые молекулы в столбообразные пустоты проникать не будут. Это хорошо видно на рис. 1d и рис. 1e, где показана экспериментально измеренная поверхность кремния при напылении на эту поверхность индия [6]. При длительном напылении молекулы и кластеры индия располагаются вокруг столбообразных пустот.

Минимальное увеличение энергии ионизации отрицательных ионов в столбообразной пустоте реализуется, когда между катодом и анодом на

столбообразную пустоту не наносится или наносится только один монослой молекул полупроводника на металлическую основу. Наносить более одного монослоя вокруг столбообразных пустот не следует, так как на внешней поверхности алюминия вокруг столбообразной пустоты начнут образовываться кластеры, которые резко уменьшат напряженность внешнего поля внутри столбообразных пустот в алюминии, что приведет к резкому уменьшению тока проводимости между катодом и анодом.

Энергия связи напыляемых трехатомных молекул на поверхность алюминия вокруг столбообразных пустот определяется кулоновским взаимодействием заряженных частиц адсорбированных трехатомных молекул, а также диполь-дипольным взаимодействием атомов в трехатомных молекулах, что составляет 0,0444 эВ и 0,121 эВ соответственно для германия и кремния. Такие энергии связи остаются устойчивыми до температур 515 К для германия и 1400 К для кремния. Следовательно, при легировании трехатомными молекулами германия или кремния на поверхность алюминия возникает прочная энергетическая связь с соответствующим расположением энергетических уровней в запрещенной зоне алюминия. При этом происходит образование отрицательных ионов атомов германия или кремния в столбообразных пустотах.

Так как молекулы кремния на основе алюминия обладают энергией связи, которая существенно выше, чем у молекулы германия, диоды на основе кремния применяют в высокотемпературной области. Чтобы получить эффективный $p-n$ переход, время напыления подбирают чисто экспериментально. Это обусловлено тем, что напыление путем испарения длится до тех пор, пока все столбообразные пустоты будут заполнены тремя молекулами полупроводника.

Теория испарения, развитая в работе [19], позволяет определять плотность потока частиц испарения с учетом коэффициента Герца-Кнудсена $J_{ev,i}$. Время полного заполнения столбообразных пустот тремя молекулами примеси составит

$$dt = \frac{3}{J_{ev,i} \delta S}. \quad (3)$$

На основании рис. 1d обозначим: S – площадь, нанесенная полупроводником; δ – доля поверхности, занимаемая столбообразными пустотами, $\delta = \delta_1 \delta_2$. Первая доля δ_1 определяется отношением площади, которая содержит столбообразную пустоту совместно с молекулами, окружающими пустоту, а вторая доля δ_2 есть отношение площади самой пустоты к площади окружения совместно с пустотой.

При производстве диодов используются точечная, плоскостная и диффузионная технологии. Во всех этих технологиях зона контакта металл – полупроводник является плоским конденсатором. В точечной технологии плоский конденсатор обладает емкостью не более 1 пФ, а электрический

ток не превышает 20 мА. Точечная технология применяется при производстве преимущественно германиевых диодов.

При производстве кремниевых диодов используется в основном плоскостная или диффузионная технология. В этом случае плоский конденсатор обладает емкостью более 10 пФ. Для площади контакта $S = 100 \times 100 \text{ мкм}^2$, которую используют в технологии формирования $p-n$ перехода, время напыления германия на такую поверхность алюминия в столбообразной пустоте составляет $dt_{\text{Ge}} \cong 133 \text{ с}$, а для кремния $dt_{\text{Si}} \cong 58,6 \text{ с}$. При напылении индия на поверхность кремния с такой же площадью время напыления $dt_{\text{In}} \cong 261 \text{ с}$. При двадцатиминутном напылении индия были заполнены все столбообразные пустоты и реализуется полное заполнение кластерами индия поверхности вокруг столбообразных пустот. Следовательно, для полного заполнения столбообразных пустот кремния молекулами индия в процессе легирования необходимо производить напыление менее двух минут, что подтверждается теоретическим расчетом.

Если учесть, что температура кипения у германия и кремния выше, чем у индия, то время заполнения столбообразных пустот должно быть наименьшее для кремния и наибольшее для индия. Теоретический расчет подтверждает этот вывод.

При прямом приложенном напряжении внутренний мономолекулярный нанесенный слой расположен у катода, а при обратном приложенном напряжении мономолекулярный слой расположен у анода. Толщина между катодом и анодом алюминия составляет не менее двух его молекулярных слоев.

Результаты полученных значений энергий связи приведены в табл. 2. В столбообразной пустоте молекулы германия и кремния с поверхностью кристалла алюминия связаны достаточно прочно. Поэтому внутри столбообразной пустоты молекулы германия и кремния на поверхности кристалла самопроизвольно распадаются на отдельные атомы.

Таблица 2

Энергия связи при разных типах взаимодействий, эВ

Binding energy for different types of interactions, eV

Параметр	Контакты			
	Поверхность вокруг столбообразной пустоты		Столбообразная пустота	
	германий – алюминий	кремний – алюминий	германий – алюминий	кремний – алюминий
1-й монослой	0,0444	0,1210	5,1000	5,5200
2-й монослой	германий – германий	кремний – кремний	германий – атомы германия	кремний – атомы кремния
	0,0377	0,216	0,0134	0,0576
3-й монослой	0,0377	0,216	0,0134	0,0576

Приложенное внешнее нормальное напряжение U внутри столбообразной пустоты практически полностью падает на толщине молекулярного слоя алюминия у катода и анода. При более длительном напылении крем-

ния или германия происходит их осаждение вокруг столбообразных пустот. В этом случае напряженность электрического поля в адсорбированных слоях между катодом и анодом равна

$$E_{\text{э}} = \frac{U}{(2d_{\text{Al}} + kd_p)}, \quad (4)$$

где d_{Al} – диаметр молекулы алюминия; d_p – то же молекулы напыленной примеси; k – количество мономолекулярных слоев примеси вокруг столбообразных пустот на алюминии.

Результаты выполненных расчетов для каждого нанесенного на металлическую основу алюминия мономолекулярного слоя полупроводника при внешнем напряжении 0,25 В для германия и 0,55 В для кремния приведены в табл. 3. Возникающие напряженности электрических полей в столбообразных пустотах настолько большие ($\sim 3 \cdot 10^7$ В/м), что возникающая поляризация атомов в трехатомных молекулах алюминия и в молекулах примеси вокруг столбообразных пустот приводит к тому, что их внутренние дипольные моменты выстраиваются вдоль направления внешнего электрического поля.

Таблица 3

Напряженность электрического поля, концентрация атомов в столбообразной пустоте и электронов у зоны проводимости, подвижность электронов и электрические токи при нанесении одного, двух и трех мономолекулярных слоев полупроводникового материала

Electric field strength, concentration of atoms in a columnar cavity and concentration of electrons near the conduction band, electron mobility and electric currents during deposition of one, two and three monomolecular layers of semiconductor material

Параметр	Количество внешних нанесенных монослоев			
	0	1	2	3
Ge, $E_{\text{э}}$, В/м	$2,39 \cdot 10^8$	$1,68 \cdot 10^8$	$1,29 \cdot 10^8$	$1,05 \cdot 10^8$
Si, $E_{\text{э}}$, В/м	$3,80 \cdot 10^8$	$3,00 \cdot 10^8$	$2,46 \cdot 10^8$	$2,07 \cdot 10^8$
Ge, v_e , м/с	$4,90 \cdot 10^3$	$5,19 \cdot 10^3$	$5,34 \cdot 10^3$	$5,44 \cdot 10^3$
Si, v_e , м/с	$7,34 \cdot 10^3$	$7,74 \cdot 10^3$	$7,95 \cdot 10^3$	$8,080 \cdot 10^3$
Ge, I , А	0,0733	4,63/0,128	0,168	0,194
Si, I , А	0,313/0,0087	0,011	0,030	2,016/0,056

Из табл. 3 следует, что сформированный диод на контакте металл – полупроводник наиболее эффективно работает, когда наносится полупроводниковый материал на металл только в столбообразную пустоту и при этом обеспечено совпадение этих пустот на электродах алюминия катоде и аноде. В этом случае работает только один моноатомный слой полупроводникового материала*, который находится в столбообразной пустоте на поверхности катода кристалла алюминия с поверхностью (111).

* Вот почему производство чипов является сложной технологией, так как наносить на основу следует только один монослой примесей, а это задача непростая.

Важно также выяснить, как влияет расположение энергетических уровней отрицательных ионов германия или кремния на возникновение свободных электронов у зоны проводимости алюминия.

Возникновение свободных электронов у зоны проводимости алюминия при ионизации отрицательных ионов у катода. Напыление германия или кремния в процессе легирования производится на поверхность алюминия в индексах Миллера [111]. Поверхностный слой и кристалл алюминия представляют единое целое. Структура такой поверхности показана на рис. 1b, а возникающая столбообразная пустота между кристаллами при их совпадении – на рис. 2. Черными точками отмечено расположение электронов в отрицательных ионах атомов примеси. Электроны в атомах примеси связаны энергией сродства. Поэтому под действием температуры и приложенного внешнего электрического поля катод покидают электроны с отрицательных ионов и двигаются к аноду, создавая электрический ток проводимости. Преодолеть энергию связи атомов с кристаллом при нормальной температуре невозможно. Поэтому температурная ионизация отрицательных ионов не является определяющей. Приложенное нормальное напряжение U у катода вблизи зоны проводимости алюминия уменьшает энергию сродства. В этом случае вероятность ионизации отрицательных ионов германия или кремния возрастает. Возникнут дополнительные свободные электроны и увеличится ток проводимости. На основании закона Максвелла–Больцмана у зоны проводимости алюминия появятся свободные электроны. Концентрация свободных электронов на основании работ [9, 12] в столбообразной пустоте равна

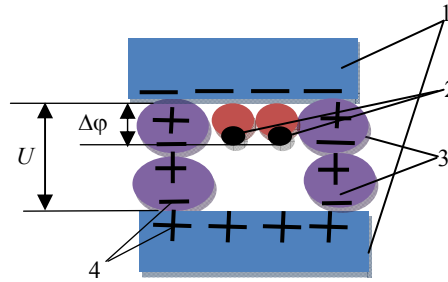


Рис. 2. Столбообразная пустота:
1 – кристалл алюминия; 2 – отрицательные ионы примеси; 3 – молекулы на поверхности алюминия; 4 – двойной электрический слой

Fig. 2. The columnar cavity:
1 – aluminum crystal; 2 – negative impurity ions; 3 – molecules on the surface of aluminum; 4 – double electric layer

$$n_e = n_a \exp \left[-\frac{\Delta E_A}{k_b T} \left(1 - \frac{e^2 \Delta \phi^2}{\Delta E_A^2} \right) \right], \quad (5)$$

где ΔE_A – энергия удаления от дна зоны проводимости алюминия энергетического уровня сродства к электрону атомов германия или кремния; T – температура контакта внутри диода; $\Delta \phi$ – приложенная разность потенциалов на атомах примеси (рис. 2). Знак (–) соответствует прямому приложенному напряжению.

Из рис. 2 следует

$$\Delta\varphi = U \frac{r_a}{2d_{Al} + kd_p}. \quad (6)$$

Здесь U – приложенная разность потенциалов между катодом и анодом; r_a – радиус атома примеси; d_{Al} – диаметр молекулы алюминия; k – число нанесенных молекулярных слоев примесей вокруг столбообразной пустоты; d_p – то же молекулы примеси.

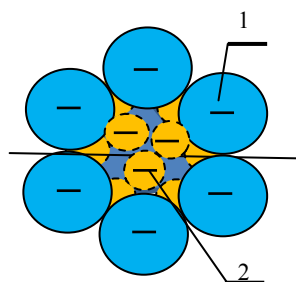


Рис. 3. Расположение атомов внутри столбообразной пустоты: 1 – молекулы алюминия; 2 – атомы примеси

Fig. 3. Arrangement of atoms inside a columnar cavity: 1 – aluminum molecules; 2 – impurity atoms

Из рис. 1d следует, что в каждой столбообразной пустоте по размеру может находиться не более трех молекул кремния или германия, каждая из которых содержит три атома. Молекулы примеси в столбообразной пустоте взаимодействуют с тремя атомами алюминия. В этом случае на поверхности кристалла алюминия будет 9 атомов примеси. Их расположение на поверхности кристалла алюминия в столбообразной пустоте приведено на рис. 3. В центре пустоты содержатся три атома от всех

трех молекул примеси. Остальные 6 атомов расположены под молекулами поверхностного слоя алюминия. Поэтому непосредственно с кристаллом алюминия взаимодействуют только те молекулы германия или кремния, которые проникают в столбообразные пустоты. Остальные молекулы осаждаются на поверхностном слое вокруг столбообразной пустоты, которая формируется трехатомными молекулами алюминия. В этом случае молекулы внутри столбообразной пустоты распадаются на атомы с образованием отрицательных ионов вследствие обмена валентными электронами атомов адсорбированных молекул с электронами, которые находятся внутри кристалла и распределены по энергиям относительно уровня Ферми.

На основании результатов, полученных в работах [5, 20], в молекулах на поверхности кристалла каждый атом является отрицательным ионом. Сродство к электрону у атомов алюминия равно $\sim 0,44$ эВ [15], а в совокупности для молекулы алюминия в целом сродство к электрону под действием высокого приложенного электрического поля составит $\sim 1,32$ эВ. При достаточно сложном распределении электрических зарядов на поверхности алюминия для атомов примеси эффективное значение сродства к электрону может оказаться больше, чем для нейтрального атома. Из рис. 4 следует, что электрон отрицательного иона примеси взаимодействует только с одним наведенным дипольным моментом атомов молекул алюминия и примесей. Результат такого электрон-дипольного взаимодействия

с напылением одного слоя молекул примеси вокруг столбообразной пустоты (рис. 4) составляет: $\sim 0,121$ эВ – для германия; $0,171$ эВ – для кремния. Чтобы ионизовать отрицательный ион примеси, необходимо преодолеть энергию сродства к электрону и энергию электрон-дипольного взаимодействия. Для германия без напыления молекул вокруг столбообразной пустоты энергия электрон-дипольного взаимодействия составляет $\Delta E_{A,эфф} = 0,382$ эВ, а при напылении одного слоя молекул германия вокруг столбообразной пустоты $\Delta E_{A,эфф} = 0,364$ эВ. В таких же условиях для кремния получаем соответственно $\Delta E_{A,эфф} = 0,656$ эВ и $\Delta E_{A,эфф} = 0,684$ эВ.

Если потенциал ионизации атомов внутри осажденной молекулы будет примерно равен максимуму функции распределения валентных электронов внутри кристалла, то произойдет почти резонансный обмен электронами и атомы трехатомных молекул превратятся в отрицательные ионы. Так как концентрация электронов внутри металла очень высо-

кая $\left(n_e = \frac{1}{8r_{Al}^3} \approx 4,27510^{28} \text{ м}^{-3} \right)$, обмен электронами осуществляется весь-

ма эффективно. Атомы примеси на поверхности кристалла алюминия пребывают в виде отрицательных ионов практически постоянно, так как убыль отрицательных ионов германия или кремния на поверхности кристалла алюминия при их ионизации непрерывно восполняется путем обмена электронами между распределением их по энергиям в кристалле алюминия. Поэтому ранее полагали, что связанные электроны в отрицательных ионах – это «тяжелые» электроны, а свободные электроны после ионизации отрицательных ионов – это «легкие» электроны, и они отличаются по массе* [2].

Молекулы германия или кремния, которые осаждаются на поверхностный слой вокруг столбообразной пустоты металлической основы алюминия, непосредственно взаимодействуют с молекулами поверхностного слоя алюминия. В этом случае образование отрицательных ионов молекул примеси происходит более сложным образом. Однако электроны в трехатомных молекулах примеси находятся в связанном состоянии, и поэтому они не могут участвовать в формировании электрического тока проводимости.

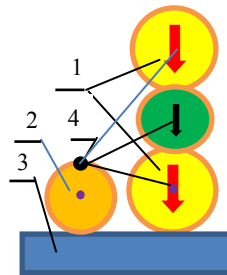


Рис. 4. Взаимодействие электрона отрицательного иона с дипольными моментами атомов молекул алюминия: 1 – атомы в молекуле алюминия; 2 – атом примеси; 3 – кристалл алюминия; 4 – электрон отрицательного иона примеси

Fig. 4. Interaction of the electron of a negative ion with the dipole moments of atoms of aluminum molecules: 1 – atoms in the aluminum molecule; 2 – an impurity atom; 3 – an aluminum crystal; 4 – an electron of a negative impurity ion

* Электрон является фундаментальной частицей, и поэтому разных электронов в природе не существует.

Из девяти атомов трехатомных молекул примеси в центре столбообразной пустоты находятся только три атома. Остальные атомы пребывают под молекулами алюминия и скрыты от воздействия внешнего электрического поля, как это представлено на рис. 3. В этой связи для германия или кремния электрический ток формируется двумя областями. Первая область – это три атома примеси в центре столбообразной пустоты, на которые полностью воздействует внешнее электрическое поле при заданной температуре. Вторая область содержит 6 атомов, на которые внешнее электрическое поле воздействует частично, так как они экранируются молекулами поверхностного слоя алюминия. Величина экранировки на основании рис. 3 составляет

$$1 \cdot \theta = 1 - \frac{(4 - \pi)r_{\text{Al}}^2}{\pi r_a^2}. \quad (7)$$

Для германия $\theta = 0,618$ и для кремния $\theta = 0,585$. При наличии экранировки электрический ток для шести скрытых отрицательных ионов германия под молекулами алюминия определяется преимущественно за счет температуры, а три атома в центре столбообразной пустоты формируют электрический ток при полном воздействии температуры и приложенного внешнего поля.

Когда энергия, которую приобретает электрон в отрицательном ионе от внешнего приложенного электрического поля, достигнет значения, равного или большего разности энергий связи электрона в отрицательном ионе германия или кремния и дна зоны проводимости алюминия, внутри столбообразной пустоты увеличение свободных электронов прекратится, так как все отрицательные ионы превратятся в нейтральные атомы. В этом случае прекратится рост протекания электрического тока проводимости в контакте металл – полупроводник. Такое прекращение тока проводимости возникнет для трех атомов в центре столбообразной пустоты при выполнении условия

$$e\Delta\varphi \cong E_A. \quad (8)$$

Для шести скрытых атомов отрицательные ионы будут полностью ионизированы, когда приложенное внешнее поле достигнет выполнения условия

$$e\Delta\varphi \cong E_{A,\text{эфф}}. \quad (9)$$

Здесь $E_{A,\text{эфф}}$ – открытая часть площади атомов примеси, которая воспринимает внешнее воздействие электрического поля, т. е.

$$E_{A,\text{эфф}} = (2 - \theta)E_A. \quad (10)$$

Условие (9) для германиевого и кремниевого диодов должно выполняться соответственно при прямом приложенном напряжении 0,243 и 0,513 В, которые формируются отрицательными ионами этих атомов.

Кроме этого, необходимо учитывать, что электронный газ в столбообразных пустотах после прохождения p – n перехода не находится в термодинамическом равновесии с температурой конструкции диода. В результате при прямом внешнем напряжении температура электронного газа несколько уменьшается, а при обратном приложенном напряжении, наоборот, возрастает. Учитывая изменение электронной температуры при прохождении p – n перехода, рассмотрим более детально, как формируются токи проводимости и токи смещения в контакте металл – полупроводник.

Условия возникновения электрического тока проводимости и тока смещения. Чтобы воспользоваться формулой (2) для определения тока проводимости, возникающего при подаче прямого напряжения в контакте металл – полупроводник, необходимо определить величину подвижности свободных электронов, которые совершают движение от зоны проводимости к валентной зоне алюминия по столбообразным пустотам, т. е. при движении между катодом и анодом. Следовательно, по всей поверхности катода электроны совершают движение от катода к аноду только по столбообразным пустотам. Очевидно, что подвижность свободных электронов происходит при движении внутри столбообразных пустот, сформированных между катодом и анодом, вследствие прямопролетного режима [20]. Тогда

$$v_e = a \sqrt{\frac{e(U - \Delta\phi)}{m_e}}, \quad (11)$$

где m_e – масса электрона.

Если использовать в качестве анода и катода алюминий с поверхностью Миллера [111], то величина $a = 1$, а если в качестве анода применить поликристаллический алюминий, то из анализа поверхности (рис. 1а) вероятность совпадения столбообразных пустот у катода с такими пустотами у анода равна $a = \left(\frac{2,5}{15}\right)^2$. На основании рис. 4 получим

$$(U - \Delta\phi) = U \frac{2\Delta d_{Al} - d_a}{2\Delta d_{Al}}. \quad (12)$$

Здесь d_{Al} – диаметр молекулы алюминия; d_a – то же атома примеси.

Для определения электрического тока по формуле (2) ранее полагали, что подвижность электрических зарядов по всей площади электродов алюминия происходит вследствие диффузии. В этом случае разогрев контакта катод – анод происходит не должен. Реально сильный разогрев происходит только анода. Из катода до поверхности анода распространяется поток электронов по столбообразным пустотам в прямопролетном режиме. В столбообразных пустотах электроны резко ускоряются и достигают значения скорости, определяемой по формуле (11).

При пролете электронов в столбообразной пустоте от катода к аноду возникает излучение в инфракрасной области, которое поглощается боковыми стенками столбообразной пустоты со слабым разогревом области контакта двух материалов. Анод при этом будет эффективно разогреваться электронами проводимости прямым электронным ударом. Поэтому анод следует охлаждать путем его изготовления более массивным, что практически реализовано. Для более эффективной работы диодов важно обеспечить совпадение столбообразных пустот на алюминиевых электродах катода и анода.

В общем случае в формуле (2) следует учитывать долю совпадения столбообразных пустот по всей площади напыленной поверхности алюминиевой основы диода, а именно, для центральных трех атомов ($N = 3$). На основании рис. 4 с учетом воздействия на ионизацию примесей внешним электрическим полем общий электрический ток проводимости составит

$$I_1 = J_1 S = en_{e,1} v_1 b S. \quad (13)$$

Электрический ток проводимости возникает только в столбообразных пустотах. Из рис. 1б следует, что результирующая доля этих пустот δ состоит из двух частей. В результате величина $b = 0,8\delta_1\delta_2$, где 0,8 – доля площади электродов, которая, как полагают, свободна от дефектов. Из рис. 1б величина b находится для кремния. Для других веществ величина b определяется путем умножения на квадрат отношения соответствующих радиусов молекул основы и примесей.

Доля несовпадения столбообразных пустот учтена при определении подвижности электронов проводимости в формуле (11), а концентрация электронов в столбообразной пустоте для трех атомов примеси в центре пустоты в соответствии с рис. 2 определяется следующим образом:

$$n_{e,1} = \frac{N_a \vartheta_1}{\pi r_{Al}^2 (2d_{Al} - d_a)}, \quad (14)$$

где $N_a = 3$ – число открытых атомов примеси в столбообразной пустоте; d_{Al} – диаметр молекулы алюминия, который формирует столбообразную пустоту; d_a – то же атомов примеси; ϑ_1 – вероятность ионизации отрицательных ионов на катоде, определяемой по (7).

Для шести атомов примеси, затененных молекулами алюминия (рис. 3), в электрическом токе учитывается величина затенения и дополнительное изменение энергии сродства при воздействии отрицательных ионов алюминия на атомы примеси. В этом случае необходимо учитывать величину затенения (14), которая приводит к эффективному росту энергии сродства, определяемой по формуле (9). Кроме этого, в (14) изменится количество атомов N_a , которое равно шести. Электрический ток, создаваемый шестью атомами примеси, определяется следующим образом:

$$I_2 = J_2 S = en_{e,2} v_1 b S_p. \quad (15)$$

В формуле (15) концентрация электронов равна

$$n_{e,2} = \frac{2N_a \vartheta_1 (1-\theta)}{\pi d_{Al}^2 (2d_{Al} - d_a)}. \quad (16)$$

Результаты выполненных расчетов при внешнем приложенном напряжении 0,25 В для германиевого диода и 0,55 В для кремниевого диода при температуре 20 °С с учетом несовпадения столбообразных пустот катода и анода, а также наличия дефектов в поверхностном слое приведены в табл. 3. Полученное значение порядка величины электрического тока соответствует экспериментальным данным, когда напыление произведено одним слоем примеси вокруг столбообразной пустоты на пластину алюминия размером 100×100 мкм, но без учета падения температуры электронного газа вследствие преодоления контактной разности потенциалов в переходе металл – полупроводник.

В технологии изготовления диодов на одну из пластин алюминия наносят германий или кремний, затем приставляют вторую пластину алюминия. Обе пластины алюминия служат электродами. В пределах первой минуты легирования заполняются столбообразные пустоты. После полного их заполнения тремя молекулами происходит осаждение молекул германия или кремния вокруг столбообразных пустот. После первой минуты напыления молекулы кремния или германия в столбообразные пустоты проникать не должны, они оседают на внешней стороне поверхностного слоя алюминия вокруг столбообразных пустот. Эти молекулы примеси накапливаются на внешней стороне поверхностного слоя кристалла алюминия. У анода между кристаллом и внешней стороной поверхностного слоя из молекул алюминия, пребывающих в виде отрицательных ионов, возникает как бы плоский конденсатор, через который свободные электроны не проходят. При этом возникает двойной электрический слой с изменяющейся концентрацией заряженных частиц, внутри которого реализуется нормальная и тангенциальная составляющие электрического поля. Появление переменной тангенциальной составляющей внешнего электрического поля – условие возникновения электрического тока смещения.

Перенос энергии током смещения определяется вектором Умова–Пойнтинга, а именно [23, 24]:

$$\vec{P} = \left[(\vec{E}_\tau + \vec{E}_n) \cdot \vec{H} \right] = \left[\vec{E}_\tau \vec{H} \right] + \left[\vec{E}_n \vec{H} \right], \quad (17)$$

Для электромагнитного поля имеет место равенство [20]

$$E_\tau dx = dU = v \frac{\mu_r \mu_0 I}{2\pi r_0}, \quad (18)$$

где μ_r – относительная магнитная проницаемость среды; μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость вакуума; I – электрический ток; r_0 – радиус столбообразной пустоты.

В контакте металл – полупроводник при прямом приложенном внешнем напряжении у катода возникает ток проводимости, а у анода – ток смещения, и происходит это в разных областях поверхности.

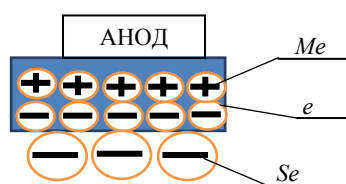


Рис. 5. Контакт металл – полупроводник

Fig. 5. Metal – semiconductor contact

При обратном приложенном напряжении граница перехода от полупроводника к металлу показана на рис. 5. Внутри столбообразной пустоты поверхность металла является кристаллом, который формируется атомами. На поверхности положительно заряженные атомы, обладающие сродством к электрону, пребывают в виде отрицательных ионов. В результате на поверхности кристалла в столбообразных пустотах возникает двойной электрический

слой типа плоского конденсатора. Легированные атомы полупроводника, обладающие сродством к электрону, также пребывают в виде отрицательных ионов. Под действием температуры и приложенного внешнего электрического поля отрицательные ионы полупроводника ионизируются и поставляют в границу перехода свободные электроны (на рис. 5 обозначены буквой e).

Свободные электроны не могут преодолеть двойной электрический слой, сформированный на поверхности металла, поэтому на толщине двойного слоя создают электрическое поле. Это поле на поверхности металла обладает максимальным значением, а на границе положительно заряженного слоя полностью компенсируется. Электрическое поле внутри двойного электрического слоя непрерывно изменяется на расстоянии в четверть длины волны, которая равна ширине двойного электрического слоя алюминия. Отсюда следует, что постоянный электрический ток в металлах обладает сверхвысокой частотой колебания и является током смещения.

Для алюминия частота колебания тока смещения $f = \frac{4c}{r_{Al}} = 8,4 \cdot 10^{18}$ Гц, а для

меди $f = 9,4 \cdot 10^{18}$ Гц. Постоянный ток в проводниках обладает очень большой частотой колебания. Это известный экспериментальный факт. Энергия сродства для атомов алюминия 0,44 эВ, а для атомов меди 1,23 эВ. Самое минимальное преодоление двойного электрического слоя соответствует алюминию. Это основная причина применения алюминиевых проводов в силовой энергетике.

Для доказательства того, что отрицательные ионы атомов основы металла и атомы полупроводниковых материалов определяют выпрямительные свойства полупроводниковых диодов, достаточно рассмотреть вольт-амперные характеристики для токов проводимости и смещения при прямом и обратном приложенном внешнем напряжении в контакте металл – полупроводник. Этому посвящен второй раздел.

ВЫВОДЫ

На основании проведенного экспериментального и теоретического анализа поверхностей, формируемых $p-n$ переход, при нанесении полупроводниковых материалов на металлическую основу алюминия установлено следующее:

1. Твердые тела алюминия, германия и кремния формируются трехатомными молекулами. Дипольные электрические моменты атомов внутри трехатомных молекул располагаются так, что в центре молекулы возникает нескомпенсированный электрический заряд положительного или отрица-

тельного знака с равной вероятностью. Внешняя поверхность кристалла из трехатомных молекул покрыта мономолекулярной пленкой из поверхностных кластеров, в центре которых возникают столбообразные пустоты.

2. Кристалл из трехатомных молекул формируется объемными кластерами с плотной упаковкой. При этом атомы внутри объемного кластера вследствие обмена внешними валентными электронами создают кристаллическую решетку, в узлах которой расположены положительно заряженные ядра атомов, а между атомами находятся электроны в виде облака и прочно связаны с остовом кристаллической структуры. В кристалле реализуются три области, как то: зона проводимости, запрещенная зона и валентная зона. Поверхностные кластеры данного вещества из трех- или двухатомных молекул экранируют кристаллическую структуру.

3. При легировании кристалла алюминия германием или кремнием в столбообразные пустоты проникают только три молекулы, которые распадаются на атомы. При длительном легировании молекулы германия или кремния оседают вокруг столбообразных пустот. Для определения длительности легирования применена теория испарения [19].

4. В диодах применяется нормальное внешнее электрическое поле, и направлено оно от контакта металл – полупроводник (катод) до поверхности кристалла (анода), а в стабилитронах – обратное внешнее электрическое поле, и направлено оно от поверхности кристалла (анода) до контакта металл – полупроводник.

5. В диодах и стабилитронах электрический ток формируется не движением электронов и «дырок», а током проводимости и током смещения с использованием закона полного тока. Во внешней цепи возникает только ток смещения.

6. Ток проводимости формируют свободные электроны, которые возникают при ионизации отрицательных ионов примеси у контакта металл – полупроводник, а также вследствие термоавтоэлектронной эмиссии с чистого металла, преодолевая работу выхода.

7. Ток смещения возникает у границы контакта металл – полупроводник, когда образующиеся электроны обладают энергией, меньшей работы выхода применяемого металлического электрода. Если образующиеся свободные электроны обладают энергией, большей работы выхода используемого металлического электрода, то такие электроны накапливаются у поверхности, формируемой положительными ионами кристалла, и создают электрическое поле, которое препятствует движению свободных электронов. Когда энергия таких электронов становится меньше работы выхода, то возникает тангенциальное электрическое поле, которое формирует ток смещения.

8. При обратном приложенном внешнем напряжении возникает электрический ток проводимости вследствие термоавтоэлектронной эмиссии с катода. На границе металл – полупроводник ток проводимости превращается в ток смещения. Поэтому в столбообразной пустоте возникает как ток проводимости, так и ток смещения. В этом случае применяется закон полного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жеребцов, И. П. Основы электроники / И. П. Жеребцов. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
2. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника: учеб. для вузов / Ю. С. Забродин. М.: Альянс, 2013. 496 с.

3. Гладков, Л. Л. Физические основы электроники: учеб. пособие / Л. Л. Гладков, И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич. Минск: Белорус. гос. академия связи, 2017. 227 с.
4. Гречихин, Л. И. Удельное электрическое сопротивление при токах проводимости и токах смещения / Л. И. Гречихин // *Авиационный вестник*. 2023. № 9. С. 10–21.
5. Гречихин, Л. И. Толстостенное покрытие в диоде Ганна для измерения мощности электромагнитного излучения СВЧ-диапазона / Л. И. Гречихин, Д. Ю. Олейник // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2023. № 8. С. 1–16.
6. Шмермбекк, Ю. Исследования поверхностного слоя кремния с напылением индия / Ю. Шмермбекк, Л. И. Гречихин. Берлин: Lambert. Academic Publishing, 2015. 80 с.
7. Gretchikhin, L. I. Formation of p - n -conductivity in Semiconductors / L. I. Gretchikhin // *Military Technical Courier Scientific Periodical of the Ministry of Defence of the Republic of Serbia*. 2018, Vol. 66, No 3. P. 304–321.
8. Гречихин, Л. И. Формирование p -, n -проводимости и p - n перехода / Л. И. Гречихин // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2018. Т. 14, № 5. С. 231–238.
9. Кластерная структура кремния и конструкция его поверхности / Л. И. Гречихин, С. Д. Латушкина, В. М. Комаровская, Ю. Шмермбекк // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2015. № 9. С. 5–10.
10. Binning, G. Scanning Tunneling Microscopy / G. Binning, H. Rohrer // *Helv. Phys. Acta*. 1982. 1982. Vol. 55, No 6. P. 726–735.
11. Гречихин, Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий. Общие основы, механические, тепловые и эмиссионные свойства / Л. И. Гречихин. Минск: Технопринт, 2004. 399 с.
12. Gretchikhin, L. I. Formation of Negative Ions on the Surface of a Solid Body and their Influence on the Thermoelectronic and Autoelectronic Emission of Free Electrons / L. I. Gretchikhin // *American Journal of Scientific Research*. 2019. Vol. 5, No 3. P. 47–55. <https://doi.org/10.11648/j.ajsr.20190503.11>.
13. Wolkow, R. Atom-Resolved Surface Chemistry Using Scanning Tunneling Microscopy / R. Wolkow, Ph. Avouris // *Physical Review Letters*. 1988. Vol. 60, No 11. P. 1049–1052. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.60.1049>.
14. Физические величины: справ. / А. И. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский [и др.]; под ред. И. С. Григорьева, Е. Д. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
15. Радциг, А. А. Справочник по атомной и молекулярной физике / А. А. Радциг, Б. М. Смирнов. М.: Атомиздат, 1980. 240 с.
16. Глинка, Н. Л. Общая химия: учеб. пособие для вузов / Н. Л. Глинка. М., 1983. 704 с.
17. Гречихин, Л. И. Аллотропия в металлах и ее влияние на работу теплового двигателя / Л. И. Гречихин, Н. Г. Куць // *Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний збірник наукових праць*. Донецьк: ДонНТУ. 2011. Вип. 42. С. 83–89.
18. Гречихин, Л. И. Взаимодействие напыляемых частиц с поверхностью твердого тела / Л. И. Гречихин, Ю. Шмермбекк // *Авиационный вестник*. 2021. № 5. С. 21–28.
19. Гречихин, Л. И. Двигатели внутреннего сгорания. Физические основы технической диагностики и оптимального управления / Л. И. Гречихин. Минск: Навука і тэхніка, 1995. 270 с.
20. Коулсон, Ч. Валентность / Ч. Коулсон. М.: Мир, 1965. 426 с.
21. Gretchikhin, L. Built-in and Induced Electric Dipole Moments in Complex Atomic Systems and in the Diatomic Molecules / L. Gretchikhin // *Авиационный вестник*. 2020. No 2. С. 28–34.
22. Гречихин, Л. И. Физика. Электричество и магнетизм. Современная электродинамика / Л. И. Гречихин. Минск: Право и экономика, 2008. 302 с.
23. Шмермбекк, Ю. Эмиссионный портрет поверхности упрочняющего конструкционного материала / Ю. Шмермбекк, Д. Б. Мигас, А. И. Гутковский [и др.] // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2020. № 3. С. 136–143.
24. Шашихин, В. Н. Подавление хаотических колебаний в малых энергетических системах / В. Н. Шашихин, Ю. М. Горячева, С. В. Будник // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 4. С. 331–340. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-331-340>.

Поступила 14.01.2025 Подписана в печать 18.03.2025 Опубликована онлайн 30.05.2025

REFERENCES

1. Zharebtsov I. P. (1990) *Fundamentals of Electronics*, Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990. 352 (in Russian).

2. Zabrodin Yu. S. (2013) *Industrial Electronics*. Moscow: Al'yans Publ. 496 (in Russian).
3. Gladkov L. L., Gulakov I. R., Zenevich A. O. (2017) *Physical Foundations of Electronics*. Minsk, Belarusian State Academy of Communications. 227 (in Russian).
4. Gretchikhin L. (2023) Specific Electrical Resistance at Conduction Currents and Displacement Currents. *The Aviation Herald*, (9), 10–21 (in Russian).
5. Gretchikhin L. I., Oleinik D. Yu. (2023) Thick-walled Coating in a Gann Diode for Measuring the Power of Microwave Electromagnetic Radiation. *Uprochnyayushchie Technologii i Pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, (8), 1–16 (in Russian).
6. Grechikhin L. I., Shmermbekk Yu. (2015) *Study of the Surface Layer of Silicon with Indium Deposition*. Berlin, Lambert. Academic Publishing. 80 (in Russian).
7. Gretchikhin L. I. (2018) Formation of p - n -Conductivity in Semiconductors. *Vojnotehnički Glasnik = Military Technical Courier*, 66 (3), 304–321.
8. Grechikhin L. I. (2018) The Formation of p -, n -Conductivity and p - n -Junction. *Uprochnyayushchie Technologii i Pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, 14 (5), 231–238 (in Russian).
9. Gretchikhin L. I., Latushkina S. D., Komarovskaya V. M., Shmermbekk Yu. (2015) The Cluster Structure of Silicon and its Surface Construction. *Uprochnyayushchie Technologii i Pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, (9), 5–10 (in Russian).
10. Binnig G., Rohrer H. (1982) Scanning Tunneling Microscopy. *Helvetica Physica Acta*, 55 (6), 726–735.
11. Gretchikhin L. I. (2004) *Physics of Nanoparticles and Nanotechnology. General Principles, Mechanical, Thermal and Emission Properties*. Minsk, Technoprint Publ. 399 (in Russian).
12. Gretchikhin L. I. (2019) Formation of Negative Ions on the Surface of a Solid Body and their Influence on the Thermoelectronic and Autoelectronic Emission of Free Electrons. *American Journal of Scientific Research*, 5 (3), 47–55. <https://doi.org/10.11648/j.ajasr.20190503.11>.
13. Wolkow, R., Avouris, P. (1988) Atom-resolved Surface Chemistry Using Scanning Tunneling Microscopy. *Physical Review Letters*, 60 (11), 1049–1052. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.60.1049>.
14. Babichev A. P., Babushkina N. A., Bratkovskii A. M., Brodov M. E., Bystrov M. V. (1991) *Physical Quantities: a Reference Book*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1232 (in Russian).
15. Radtsig A. A., Smirnov B. M. (1980) *Handbook of Atomic and Molecular Physics*. Moscow, Atomizdat Publ. 240 (in Russian).
16. Glinka N. L. (1983) *General Chemistry*. Moscow. 704 (in Russian).
17. Grechikhin L. I., Kuts' N. G. (2011) Allotropy in Metals and its Influence on the Operation of a Heat Engine. *Progresivni tekhnologii i Sistemi Mashinobuduvannya: Mizhnarodnii Zbirnik Naukovikh Prats' [Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering: an International Collection of Scientific Papers]*. Donetsk, DonNTU, Is. 42, 83–89 (in Russian).
18. Gretchikhin L., Shmermbekk J. (2021) Interaction of Sprayed Particles with Surface Solid Body. *The Aviation Herald*, (5), 21–28 (in Russian).
19. Grechikhin L. I. (1995) *Internal Combustion Engines. Physical Foundations of Technical Diagnostics and Optimal Control*. Minsk, Navuka i tehnika Publ. 270 (in Russian).
20. Coulson C. A. (1961) *Valence*. 2nd Ed. London, Oxford University Press, 404.
21. Gretchikhin L. (2020) Built-in and Induced Electric Dipole Moments in Complex Atomic Systems and in the Diatomic Molecules. *The Aviation Herald*, (2), 28–34.
22. Grechikhin L. I. (2008) *Physics. Electricity and Magnetism. Modern Electrodynamics*. Minsk, Pravo i ekonomika Publ. 302 (in Russian).
23. Shmermbekk Yu., Migas D. B., Gutkovsky A. I., Gretchikhin L. I. (2020) Emission Portrait of Surface of Reinforcing Structural Material. *Uprochnyayushchie Technologii i Pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, (3), 136–143 (in Russian).
24. Shashikhin V. N., Goryacheva J. M., Budnik S. V. (2022) Suppression of Chaotic Oscillations in Small Energy Systems. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (4), 331–340. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-331-340> (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-230-244>

УДК 622.691.4: УДК 620.193.01

Почвенно-грунтовые факторы, влияющие на процесс коррозии стальных подземных трубопроводов, и их компьютерное моделирование

В. Н. Романюк¹⁾, А. М. Нияковский²⁾, Н. В. Струцкий³⁾, А. Л. Свистун¹⁾

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

²⁾УО «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой»
(Новополоцк, Республика Беларусь),

³⁾Государственное предприятие «НИИ Белгипрогаз» (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Коррозия различных газопроводов, в особенности такая ее распространенная разновидность, как электрохимическая, представляет собой главную угрозу для стальных подземных трубопроводов на стадии эксплуатации. Негативный эффект коррозии заключается в прямых потерях металла, увеличении материальных и трудовых затрат на обслуживание, ремонт и замену трубопроводов, простоях оборудования, ухудшении безопасности и экологической ситуации в случае выхода перекачиваемого продукта (особенно, если это горючий газ или нефть и нефтепродукты) в окружающую среду. В статье приводится анализ комплекса почвенно-грунтовых факторов, влияющих на интенсивность коррозионных процессов, протекающих на подземных стальных трубопроводах, освещены актуальные исследовательские подходы к данному вопросу, отечественные и зарубежные источники. Рассмотрены ключевые параметры, определяющие коррозионную агрессивность грунта, такие как влажность, аэрированность грунта, его физико-механические свойства, химический состав грунтового электролита (в том числе содержание хлоридов и сульфатов), наличие ряда специфических почвенных микроорганизмов. Рассматривается возможность и устанавливается вывод о целесообразности использования методов компьютерного моделирования для оценки воздействия ключевых параметров с применением современных программных средств, в частности программных сред SOLID и ANSYS, а также технологий нейросетевого моделирования. Компьютерное моделирование предоставляет широкие возможности для анализа и предсказания процессов коррозии в зависимости от изменения условий окружающей среды, что может иметь важное прикладное значение для лучшего понимания данных процессов и их влияния на надежность и долговечность стальных подземных трубопроводов в данных конкретных условиях.

Ключевые слова: стальной подземный газопровод, электрохимическая коррозия, почвенно-грунтовые факторы, компьютерное моделирование, программная среда, искусственные нейронные сети

Для цитирования: Почвенно-грунтовые факторы, влияющие на процесс коррозии стальных подземных трубопроводов, и их компьютерное моделирование / В. Н. Романюк [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 3. С. 230–244. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-230-244>

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

Soil and Ground Factors Affecting the Steel Underground Pipelines Corrosion Process and their Computer Simulation

V. N. Romaniuk¹⁾, A. M. Niyakovskii²⁾, N. V. Strutsky³⁾, A. L. Svistun¹⁾

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

²⁾Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk (Novopolotsk, Republic of Belarus),

³⁾Design Research Republican Unitary Enterprise “NII Belgiprotogaz”
(Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Corrosion of various gas pipelines, especially such widespread type of it as electrochemical ones, is the main threat to steel underground pipelines during the operational phase. The negative effect of corrosion is the direct loss of metal, increased material and labor costs for maintenance, repair and replacement of pipelines, equipment downtime, deterioration of safety and environmental situation in case of release of the pumped product (especially if it is combustible gas or oil and petroleum products) into the environment. The article provides an analysis of the complex of soil-and-soil factors affecting the intensity of corrosion processes occurring on underground steel pipelines, and highlights current research approaches to this issue as well as domestic and foreign relevant literature sources. The key parameters determining the corrosive aggressiveness of the soil, such as humidity, soil aeration, its physical-and-mechanical properties, the chemical composition of the soil electrolyte (including the content of chlorides and sulfates), the presence of a number of specific soil microorganisms, are considered. The possibility and expediency of using the computer simulation method to assess their impact using modern software tools, in particular, the SOLID and ANSYS software environments, as well as neural network modeling technologies, are considered and demonstrated. Computer simulation provides ample opportunities for analyzing and predicting corrosion processes depending on changes in environmental conditions, which can be of great practical importance for a better understanding of these processes and their impact on the reliability and durability of steel underground pipelines in these specific conditions.

Keywords: steel underground gas pipeline, electrochemical corrosion, soil and ground factors, computer simulation, software environment, artificial neural networks

For citation: Romaniuk V. N., Niyakovskii A. M., Strutsky N. V., Svistun A. L. (2025) Soil and Ground Factors Affecting the Steel Underground Pipelines Corrosion Process and their Computer Simulation. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (3), 230–244. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-230-244> (in Russian)

Введение

Подземный металлический трубопровод эксплуатируется в почве (грунте), то есть в чрезвычайно сложной и динамически изменчивой вмещающей среде [1]. Почву (грунт) можно определить как многокомпонентную химическую систему, содержащую твердые, жидкие и газообразные соединения, находящиеся под действием электромагнитного и гравитационного полей и непрерывно изменяющиеся под действием биологических, гидрологических и геологических факторов [2].

Внешняя среда оказывает на трубопровод целый комплекс воздействий, в том числе коррозионное воздействие на металл трубы. Коррозионные процессы отличаются сложностью и многоступенчатостью. Первопричиной коррозии металлов и сплавов является их термодинамическая неустой-

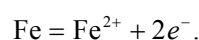
чивость в условиях внешней среды, что обуславливает возможность самопроизвольного перехода металлов и сплавов в большее устойчивое окисленное состояние [3].

Мерой термодинамической неустойчивости служит изменение энергии Гиббса (изобарно-изотермического потенциала) $\Delta_r G_{p,T}^0$, которое происходит при взаимодействии металла с коррозионно-активными веществами окружающей среды. С точки зрения термодинамики, коррозионный процесс возможен лишь при $\Delta_r G_{p,T}^0 < 0$. Чем большее отрицательное значение $\Delta_r G_{p,T}^0$, тем выше термодинамическая возможность коррозионного процесса. При этом термодинамика указывает на возможность или невозможность протекания коррозионного процесса, а его скорость определяется кинетикой и массопереносом [4, 5].

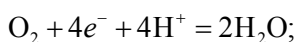
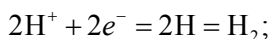
Существуют различные типы коррозионных процессов, каждый из которых имеет свои особенности. Для почвенных условий наиболее характерна электрохимическая коррозия – самопроизвольное разрушение металлических материалов вследствие электрохимического взаимодействия их с окружающей электролитически проводящей средой (почвенным электролитом – в данном случае).

Процесс электрохимической коррозии является гетерогенным и протекает на границе раздела «металл – коррозионная среда». На поверхности корродирующего металла возникают анодные (активные) и катодные (пассивные) участки. Таким образом, разрушение металла происходит под действием тока работающих гальванопар [3, 5, 6].

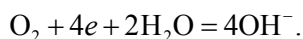
Ионизация атомов металла и восстановление окислительного компонента коррозионной среды протекают раздельно. Анодный процесс сопровождается переходом гидратированных ионов металла в раствор, для железа (стали) процесс будет иметь вид



Катодный процесс сопровождается восстановлением окислителя:
– водорода (в кислотной среде):



– кислорода (в нейтральной или щелочной среде).



В результате электрохимической коррозии происходит как образование нерастворимых продуктов (ржавчины), так и растворение металла в электролите [3, 4].

Если механизм почвенной коррозии определяется электрохимической гетерогенностью (неоднородностью) на границе раздела «металл – внеш-

ная среда», то сама эта неоднородность, в свою очередь, складывается из неоднородности металла (химической, структурной и др.) и неоднородности внешней среды. При этом степень гетерогенности вмещающей среды при подземной прокладке стального газопровода неизмеримо выше, чем у материала трубы, вследствие чего именно почвенно-грунтовые факторы определяют протекание процесса коррозии и требуют изучения в первую очередь. Вместе с тем отмеченная чрезвычайная изменчивость почвенных условий одновременно усложняет задачу их изучения и анализа.

Основная часть

Учитывая актуальность вопроса изучения и анализа почвенно-грунтовых факторов, определяющих процесс коррозии подземных металлических сооружений и, в частности, стальных подземных трубопроводов, данная проблематика на постоянной основе привлекает внимание отечественных и зарубежных исследователей.

Традиционно к влияющим на протекание подземной коррозии стальных трубопроводов относят следующие основные факторы:

- структуру грунта;
- влажность грунта;
- температуру грунта;
- солевой состав грунтового электролита (в первую очередь, концентрацию хлоридов и сульфатов);
- водородный показатель (pH);
- воздухопроницаемость, аэрацию (содержание кислорода);
- газовый состав грунта (в первую очередь, содержание углекислого газа);
- электропроводность грунта;
- микробиологический состав (наличие сульфатвосстанавливающих бактерий, аэробных серобактерий).

При этом большинство факторов являются многоуровневыми. Так, например, влажность грунта, в свою очередь, будет зависеть от:

- уровня грунтовых вод;
- количества осадков;
- скорости фильтрации воды в грунте;
- скорости испарения воды с поверхности земли;
- рельефа местности и т. д.

Таким образом, число влияющих на процесс электрохимической коррозии факторов, даже если говорить об основных из них, чрезвычайно велико, к тому же практически все они в различной степени связаны между собой и имеют разнонаправленное взаимное влияние, давая в различных комбинациях различный результат. Исходя из этого все перечисленные выше факторы, как правило, не учитываются в факторной модели, и важным аспектом становятся подходы, применяемые различными исследователями к структурированию и группировке факторов, выявлению их взаи-

мосвязей, выделению ключевых параметров, определяющих итоговое воздействие почвенно-грунтовой среды на коррозионные процессы.

Так, в исследовании [7] отмечается, что интенсивность коррозии внешней поверхности трубопроводов зависит как от физического состояния и химического состава почвы и грунта, так и от климатических условий, которые влияют на температуру, влажность, химические и микробиологические процессы. Скорость коррозии металла в почве и грунте зависит от их свойств, а именно от влажности, а также структуры и пористости, которые определяют их влагоемкость и водопроницаемость. Среди влияющих факторов указываются минерализация грунтовых вод, воздухопроницаемость, удельное электрическое сопротивление грунта.

Имеет значение и то, что наибольшее количество трубопроводов проложено в дисперсных грунтах, состоящих из совокупности твердых частиц, зерен, обломков, других элементов, между которыми есть физические, физико-химические или механические структурные связи. Существенное влияние на коррозию трубопроводов оказывает гранулометрический состав грунтов – процентное содержание первичных (то есть не связанных в агрегаты) частиц различной крупности по фракциям, выраженное по отношению к их общей массе [8]. В почвах и грунтах присутствуют частицы размером от тысячных миллиметра до нескольких сантиметров. Соответственно, чем мельче частицы грунта, тем большую удельную поверхность они имеют и тем в большей степени они способны удерживать влагу. А поскольку размер глинистых частиц составляет менее 0,005 мм, при прочих равных условиях они очень хорошо удерживают влагу и в коррозионном отношении эти почвы и грунты неравноценны [7].

В обширном колумбийско-французском исследовании [9] рассмотрены основные факторы, влияющие на скорость коррозии подземных металлических конструкций. Авторы подвергли статистическому анализу массив данных (параметры почвы, глубина коррозионных повреждений) для определения корреляции между глубиной дефектов и окружающими почвенными условиями.

К ключевым факторам, способствующим внешней коррозии стальных трубопроводов, авторы относят влажность и аэрацию, от которых зависят катодные и анодные реакции на поверхности металла. Скорость коррозии увеличивается с повышением влажности почвы, однако при промежуточной степени насыщения влагой скорость коррозии достигает максимума, а затем снижается: потеря металла увеличивается до тех пор, пока вода не насыщает поры почвы, после чего снабжение кислородом сокращается, что приводит к снижению скорости коррозии. Помимо влагосодержания, важную роль в коррозии играет снабжение почвы кислородом. В целом почвы с большим содержанием воды и растворенного кислорода способствуют катодному процессу. Напротив, почвы с низким уровнем влаги и растворенного кислорода создают анодную область, которая способствует образованию точечной коррозии.

Реактивность почвы измеряется на основе значения pH , которое находится в диапазоне от 3,5 до 9,5. Скорость коррозии увеличиваются в кислых почвах, тогда как щелочные почвы способствуют пассивному состоянию, менее подверженному коррозии. Вместе с тем кислотность почвы сама по себе не является достаточным показателем для оценки коррозионных свойств почвы. В зависимости от удельного электрического сопротивления агрессивными в отношении коррозии могут быть как кислотные, так и очень щелочные почвы [9, 10]. Снижение удельного электрического сопротивления делает почву более коррозионно-активной. На удельное сопротивление почвы, в свою очередь, влияют ее пористость, плотность, содержание ионов и проводимость грунтовых вод.

Серьезную проблему для трубопроводов представляет собой активность бактерий, которые могут прикрепляться к поверхности металла, образуя биопленки, разрушающие металл посредством биохимических реакций, связанных с их ростом и размножением [11]. Один из самых распространенных типов бактерий в почве – сульфатредуцирующие бактерии. Они анаэробны, обитают в почвах с содержанием сульфатов, низким уровнем растворенного кислорода и pH от 6 до 8 [12], в хорошо аэрированных почвах их влияние на скорость коррозии незначительно. Используя сульфаты и питательные вещества, включая органические кислоты и продукты естественного разложения органики в окружающей почве, данные бактерии выделяют в качестве побочного продукта сероводород H_2S , который может взаимодействовать с металлом, образуя сульфид железа (II) FeS [9].

С учетом всех перечисленных выше параметров анализ статистических данных проводился в три этапа. На первом этапе каждая почвенная характеристика анализировалась индивидуально для проверки ее независимости от степени коррозии с использованием таблиц сопряженности и χ^2 -теста. На втором этапе применялся метод множественного анализа соответствий (Multiple Correspondence Analysis, MCA) на основе всего набора данных для выявления связей между категориями почвы и корреляции с глубиной коррозии. На третьем этапе использовался метод кластеризации K-mode, с помощью которого группировались сочетания характеристик, связанные с более глубокими дефектами коррозии, с целью выявления возможных агрессивных особенностей почвы [9].

Исследования [13], проведенные в Университете Монаша (Австралия), касались изучения взаимодействия электрохимических реакций и физических свойств почвы, окружающей подземные металлические трубопроводы. Для моделирования коррозионных процессов был выбран подход, использующий математические зависимости для описания формы кривой потери массы металла вследствие коррозии. Согласно модели коррозия уменьшается со временем, так как продукты коррозии накапливаются на поверхности металла. При этом скорость образования коррозионных продуктов зависит от влажности и аэрации почвы.

При низких уровнях влажности коррозия происходит на изолированных участках, с увеличением влажности общая площадь коррозии возрастает. Активная область включает в себя преимущественно анодные участки, где активно происходит коррозия.

Большинство продуктов коррозии, образующихся на поверхности трубы в результате коррозионных процессов, являются нерастворимыми и обладают низкой электрической проницаемостью. Осаждение таких продуктов создает экранирующий эффект, защищая металлическую поверхность от дальнейшей коррозии. Также известно, что образование определенных гидроксидов на поверхности металла может пассивировать металл термодинамически. Совокупное влияние этих механизмов заключается в замедлении окислительной реакции из-за накопления продуктов коррозии.

Образование продуктов коррозии зависит, среди прочих факторов, от уровня влажности окружающего грунта. В сухих грунтах ионы, образующиеся в результате реакций, соединяются, формируя продукты коррозии, которые осаждаются на поверхности. При увеличении уровня влажности ионы мигрируют от поверхности трубы, прежде чем объединиться для формирования нерастворимых продуктов коррозии. Следовательно, в грунтах с высокой влажностью экранирующий эффект продуктов коррозии относительно ниже, чем в грунтах с низкой влажностью.

Авторы разделяют вывод Коула (Cole) и Марни (Marney) в работе [14], согласно которому модель для точного описания коррозии в почвах должна включать такие пять уровней явлений, как:

- анодная/катодная активность;
- эффекты оксидов;
- поверхность раздела поровой влаги и поверхности трубы;
- динамика содержания почвенной воды/воздуха;
- макроокружение.

Представленная в статье [13] модель коррозионного процесса в той или иной форме включает все эти пять уровней с акцентом на влияние аэрации почвы.

В другой статье [15] той же группы исследователей из Университета Монаша обращается внимание на тот факт, что, хотя электрическая проводимость почвы важна для макроэлементной коррозии, которая обычно наблюдается в полевых условиях, она не оказывает прямого воздействия на равномерную коррозию, которая обычно оценивается в лабораторных экспериментах. Более важным фактором в случае равномерной коррозии является область участвующей в коррозионном процессе поверхности трубопровода, то есть фактическая площадь электрода, контактирующая с электролитом, которая в конечном итоге зависит от влажности почвы.

В источнике [16] представлены результаты исследования поведения коррозии стали X80 (высокопрочной стали, часто используемой при строительстве магистральных трубопроводов) в иловой почве. Пробы почвы были взяты в окрестностях подземных нефте- и газопроводов в районе Сяодянь города Тайюань (провинция Шаньси, Китай).

Методика эксперимента предполагала предварительную обработку и обессоливание почвы, а затем моделирование различных химических параметров среды с помощью введения в подготовленный грунт искусственного электролита. В данных условиях образцы стали X80 подвергались ускоренному ржавлению, в ходе которого исследовалась микро- и макро-морфология поверхности металла.

Анализ показал, что осадочный слой можно разделить на внутренний и внешний слои. Внутренний слой состоит из тонкой и плотной оксидной пленки железа с высоким содержанием Fe и небольшим количеством кислорода. Внешний слой, напротив, является более толстым, пористым, включает частицы почвы и характеризуется рыхлой текстурой и разрозненным распределением. На обоих слоях наблюдаются дефекты, такие как поры и сквозные трещины. Через зоны дефектов восстанавливающие агенты (грунтовая вода и коррозионные ионы) достигают поверхности стального субстрата, создавая каналы для их диффузии. Таким образом, осадочный слой не может служить долгосрочной защитой металла, что способствует возобновлению электрохимической реакции коррозии.

Концентрация ионов существенно влияет на количество язв (питтингов). С одной стороны, с увеличением концентрации ионов осадочный слой на стальной поверхности становится плотнее, однако высокая концентрация соли усиливает адсорбцию и способствует расширению области коррозии с формированием питтингов под осадочным слоем.

С увеличением концентрации ионов количество продуктов коррозии по мере растворения железа постепенно возрастает. В коррозионной среде, содержащей хлориды, при той же температуре в слоях ржавчины содержится больше кислорода и меньше железа, чем в сульфатосодержащей среде. Авторы делают выводы, что содержание кислорода зависит от адгезии почвы к поверхности металла и количества продуктов коррозии на ней, и влияние хлоридов на коррозию металла в целом сильнее, чем у сульфатов [16].

Близки по методике эксперимента исследования, представленные в [17]. В данном случае моделирование коррозии в лабораторных условиях с использованием искусственного грунтового раствора проводилось для образцов стали 5L Grade X60 стандарта API 5L.

Были изучены параметры анодной и катодной поляризации в зависимости от pH и температуры. Установлено, что, если значения pH уменьшаются и приближаются к нейтральному или кислому диапазону от 4,0 до 8,0, то коррозия стали увеличивается, сопротивление поляризации уменьшается и потенциал коррозии стремится к анодным значениям. В температурном диапазоне от 25 до 50 °C коррозия стали также зависит от температуры. Плотность тока коррозии увеличивается с повышением температуры, а потенциал коррозии стали смещается в сторону отрицательных значений. Изменения электрохимических параметров при воздействии температуры в исследуемом диапазоне от 25 до 50 °C для pH , близкого к нейтральному, подтверждают влияние температуры на коррозию стали в реальной почве

как результат сезонных колебаний температуры, если различие температур является значительным [17].

В исследованиях [18] были проведены электрохимические коррозионные испытания сталей марок Q235, X65, X70 и X80. Скорость электрохимической коррозии этих четырех низкоуглеродистых сталей в соленой почве определялась стадией, лимитирующей процесс, которая менялась в зависимости от состояния поверхности электрода и окружающей среды. В течение периода коррозионных испытаний коррозия стали Q235 в основном сопровождалась массопереносом, в то время как коррозия X65 переключалась с контроля переноса заряда на контроль массопереноса, смешанный контроль и, наконец, контроль переноса заряда. Коррозия X70 и X80 переключалась с контроля переноса заряда на контроль массопереноса, а затем обратно на контроль переноса заряда. Это указывало на то, что в данном эксперименте сталь Q235 не могла самостоятельно подавлять коррозионный процесс в условиях соленой почвы. Напротив, сформированные пленки продуктов коррозии на сталях X65, X70 и X80 в определенной степени замедляли скорость коррозии.

Скорости коррозии четырех низкоуглеродистых сталей показали общую тенденцию к снижению с увеличением времени коррозии. Скорости коррозии в средней и поздней ее стадиях были намного ниже, чем на начальной стадии, и колебались в течение периода испытаний, что было вызвано разрушением и повторным образованием оксидной пленки. Общая последовательность скорости коррозии для четырех низкоуглеродистых сталей была следующей: $Q235 > X65 \approx X70 > X80$.

Для всех четырех низкоуглеродистых сталей в соленой почве наблюдалась локальная коррозия, на поверхности образцов были видны явные коррозионные язвы, пористость и трещины. Накопление продукта коррозии на поверхности стали характеризовалось низкой однородностью и компактностью. Адсорбция ионов Cl^- из соленой почвы на поверхности электрода вызывала питтинговую коррозию, разрушая слой коррозионных отложений.

Химический состав четырех низкоуглеродистых сталей отличался, что стало главной причиной различного коррозионного поведения и стойкости к коррозии в одной и той же почвенной среде. Среди четырех сталей сталь X80 демонстрировала наилучшую коррозионную стойкость, стали X65 и X70 имели сходную коррозионную стойкость, а сталь Q235 имела самую низкую коррозионную стойкость [18].

Предметом изучения еще одной группы китайских ученых стало взаимное влияние коррозии и окружающих почвенных микробных сообществ почвы на стальные подземные нефтепроводы [19]. В данном случае образцы почв были собраны во время планового технического обслуживания нефтепровода Шэнли на месторождении Дунин (провинция Шаньдун, Китай).

В исследовании подчеркивается взаимное влияние между коррозией и микробной активностью. По мере того как трубопровод разрушается, вы-

деляются продукты, влияющие на микробные сообщества, а микроорганизмы, в свою очередь, могут ускорить дальнейшую коррозию. Это взаимодействие может приводить к обратным связям, где коррозия способствует росту микроорганизмов, а их активность усиливает коррозию, создавая непрерывный цикл, который может ухудшать целостность трубопроводов с течением времени [19].

В исследовании [20], проведенном Техническим университетом в Кошице (Словакия), изучаемым материалом была сталь EN 10028/2-92, взятая с подземного трубопровода после 48-летней эксплуатации. Коррозионные испытания проводились путем погружения вырезанных образцов стали (с коррозионным слоем и предварительно шлифованных) в подготовленный коррозионный электролит. Далее проводились электрохимические измерения и стереомикроскопия поверхности образцов. Барьерный эффект коррозионного слоя привел к значению поляризационного сопротивления, превосходящему значение для шлифованной поверхности более чем в 5 раз. Скорость коррозии образца с коррозионным слоем оказалась на 72 % ниже по сравнению с поверхностью без него.

В исследовании [21] предлагается новая модель многофазного поля (multi-PF) для изучения сложного локализованного коррозионного процесса, включающего механико-электрохимическую связь, анодное растворение, образование нерастворимых продуктов коррозии и результирующую гальваническую точечную коррозию. Акцентируется внимание на влиянии концентрации ионов хлора Cl^- , значений pH и электрического поля, раскрывается автокаталитический процесс точечной коррозии под воздействием все более агрессивной внешней среды.

В условиях стремительного развития цифровых технологий в исследованиях почвенной коррозии подземных стальных трубопроводных коммуникаций, с учетом высокой сложности и вариативности коррозионных процессов и почвенной среды как таковой, свое применение находят компьютерные методы, в частности моделирование в программных средах, реализующих метод конечных элементов (SolidWorks Simulation, ANSYS), и нейросетевой анализ.

Например, в источнике [22] описывается применение компьютерного моделирования для исследования механизмов и закономерностей коррозионного растрескивания подземных трубопроводов, вызванного сочетанием коррозионных и механических нагрузок. Процессы коррозионного растрескивания смоделированы на участке подземного трубопровода длиной 1,5 м и толщиной стенки 20 мм, изготовленного из высокопрочной легированной стали типа X100. В центре участка трубопровода имеется коррозионная трещина эллиптической формы длиной 150 мм и глубиной 10 мм. Окружающая трубопровод почва играет роль почвенного электролита с заданными свойствами.

Для моделирования использовался программный продукт COMSOL-Multiphysics 5.6: CorrosionModule, включающий в себя два расчетных интерфейса – SolidMechanics (механика твердого тела) и Secondary Current

Distribution (вторичное распределение тока). Моделируемые параметры включают распределение напряжений, коррозионный потенциал, а также плотности анодного и катодного тока в зависимости от размера коррозионной трещины и продольной деформации растяжения, вызванной движением почвы. Модель, описанная в работе [22], применима для прогнозирования коррозионного растрескивания под напряжением подземных газопроводов, подверженных электрохимической коррозии и продольной деформации, вызванной движением грунта.

В статье [23] освещены результаты применения инструментов SolidWorks и COMSOL Multiphysics для моделирования и тестирования процесса коррозии подземных дегазационных трубопроводов, проложенных в шахтах. В результате исследования установлено, что дегазационная сеть шахт постоянно находится под воздействием механико-электрохимического взаимодействия, которое проявляется в продольных деформациях пород шахтного пола. Высокая интенсивность коррозии подземных трубопроводов является результатом взаимодействия металла, выступающего в качестве электрода, с подземными водами, выступающими в качестве электролита, а определяющими факторами процесса коррозии являются электропроводность почвы и деформационные процессы в трубопроводах. Компьютерная модель позволила проверить распределение напряжений, коррозионный потенциал, а также плотности анодных и катодных токов в зависимости от размера коррозионной трещины и продольной деформации пород.

Работа [24] представляет опыт применения программного комплекса ANSYS к расчету толстостенного трубопровода, подвергающегося высокотемпературной локальной водородной коррозии. В качестве ключевого преимущества ANSYS авторами указывается наличие встроенного языка параметрического программирования (APDL), позволяющего адаптировать программный комплекс к решению нестандартных задач.

Примером использования для моделирования коррозионных процессов на стальных подземных газопроводах технологий искусственных нейронных сетей (artificial neural network, ANN) являются упоминаемые выше исследования Университета Монаша [13, 15], в ходе которых была разработана нейронная сеть для прогнозирования скорости коррозии. В рамках данных исследований вначале проведен анализ коррозионного поведения трубопровода в условиях пространственно изменяющихся свойств грунта и с использованием программного обеспечения COMSOL 5.3 Multiphysics построена численная модель коррозии, учитывающая изменения почвенных параметров (для построения полей случайного распределения почвенных параметров был разработан отдельный программный модуль). На завершающем этапе создана искусственная нейронная сеть, обучение которой проводилось с помощью набора комбинаций входных и выходных параметров, полученных из численной модели. Сеть была создана с двумя узлами в каждом из входного и выходного слоев и 128 узлами в каждом из

скрытых слоев. Для настройки сети использовались нелинейная функция активации ReLU (Rectified Linear Unit) и алгоритм оптимизации Adam [25].

Сходимость результатов численной модели и нейросети была протестирована при моделировании процесса коррозии на контрольном участке трубопровода длиной 10 м и периодом эксплуатации 50 лет. Оба метода оказались близки в локализации коррозионных мест и характере коррозионного процесса. Несмотря на то что нейросеть показала некоторую тенденцию к переоценке величины и масштабов коррозионного пятна, она может быть использована для быстрого прогнозирования уровней коррозии на основе свойств грунта [13].

В исследовании [26] приводится сравнительный анализ методов поверхностного отклика (response surface methodology, RSM) из области многомерной математической статистики и искусственных нейронных сетей для предсказания скорости коррозии углеродистой стали в почве. Делается вывод, что, несмотря на сравнительную простоту прямой (feed-forward) архитектуры сети, которая считается менее точной, чем обратные (feedback) сети, она лучше подходит для моделирования взаимосвязей входных данных с одним или несколькими выходными откликами, особенно в случае с почвой.

ВЫВОДЫ

1. Почвенно-грунтовые факторы коррозии стальных подземных трубопроводов образуют целый комплекс воздействий, имеющих различный результирующий эффект в зависимости от конкретных условий, что в первую очередь обусловлено чрезвычайной сложностью и изменчивостью самой почвенно-грунтовой среды. Актуальные исследования демонстрируют различные методы к группировке и акцентированию влияющих факторов коррозии, в этой связи необходима разработка подхода к выделению ключевых параметров, определяющих течение коррозионных процессов.

2. Наибольшее внимание современных исследователей уделяется таким факторам коррозии, как влажность, аэрация, электрическое сопротивление и водородный показатель (pH) почвы, присутствие хлор-ионов. Важными аспектами являются образование на поверхности металла продуктов коррозии и влияние осадочных отложений на характер коррозии и ее скорость. Необходимо рассмотрение целесообразности совместного учета электрохимических и микробиологических коррозионных процессов, поскольку имеющиеся данные говорят о возможном взаимном усилении указанных процессов.

3. Воссоздать все возможные варианты комбинаций влияющих факторов, встречающиеся при реальной эксплуатации подземных трубопроводных сетей, в натурных либо лабораторных условиях практически невозможно и экономически нецелесообразно, в связи с чем возникает необходимость в применении новых, современных методов моделирования с использованием цифровых вычислительных средств.

4. Наиболее перспективным в этой связи представляется разработка адекватной физической модели и на ее базе использование:

- универсальных программных сред, таких как SolidWorks Simulation и ANSYS, включающих в себя большое количество специализированных модулей и надстроек для решения различных научных и инженерных задач, в том числе нестандартных;
- методов и технологий нейронных сетей (artificial neural network, ANN), представляющих широкие возможности в области предиктивной аналитики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Струцкий, Н. В. Организация электрохимической защиты стальных подземных трубопроводов от коррозии в газораспределительной отрасли Республики Беларусь / Н. В. Струцкий, В. Н. Романюк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 3. С. 257–267.
2. Околелова, А. А. Экологическое почвоведение и законы экологии: учеб. пособие / А. А. Околелова, В. Ф. Желтобрюхов, Г. С. Егорова. Волгоград: ВГАУ-ВолгГТУ, 2017. 216 с.
3. Федорченко, В. И. Коррозия металлов: учеб. пособие / В. И. Федорченко. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2009. 127 с.
4. Кулиев, С. И. Физико-химические основы коррозионных процессов: учеб. пособие / С. И. Кулиев, И. С. Борисевич. Витебск: Изд-во ВГУ им. П. М. Машерова, 2002. 71 с.
5. Новгородцева, О. Н. Коррозия металлов и методы защиты от коррозии: учеб. пособие / О. Н. Новгородцева, Н. А. Рогожников. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. 162 с.
6. Перельгин, Ю. П. Коррозия и защита металлов от коррозии: учеб. пособие / Ю. П. Перельгин, И. С. Лось, С. Ю. Киреев. Пенза: Изд-во ПГУ, 2015. 88 с.
7. Маскаленко, С. С. Особенности коррозии магистральных трубопроводов под действием почв и грунтов / С. С. Маскаленко, Е. С. Куликова // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. Хабаровск: Дальневосточ. гос. ун-т путей сообщения, 2018. Т. 1. С. 400–404.
8. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава: ГОСТ 12536–2014. Взамен ГОСТ 12536–79; 01.07.2015. М.: Стандартинформ, 2015. 18 с.
9. Statistical Soil Characterization of an Underground Corroded Pipeline Using In-Line Inspections / R. Amaya-Gómez, E. Bastidas-Arteaga, F. Muñoz, M. Sánchez-Silva // Metals. 2021. Vol. 11, No 2. P. 292–314. <https://doi.org/10.3390/met11020292>.
10. Hamilton, W. A. Sulphate-reducing Bacteria and Anaerobic Corrosion / W. A. Hamilton // Annu. Rev. Microbiol. 1985. Vol. 39. P. 195–217. <https://doi.org/10.1146/annurev.mi.39.100185.001211>.
11. Factors influencing corrosion of metal pipes in soils / M. Wasim, S. Shoaib, N. Mubarak, Inamuddin, A. Asiri // Environ. Chem. Lett. 2018. Vol. 16. P. 861–879. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0731-x>.
12. Methods to Evaluate Corrosion in Buried Steel Structures: A Review / L. Arriba-Rodriguez, J. Villanueva-Balsera, F. Ortega-Fernandez, F. Rodriguez-Perez // Metals. 2018. Vol. 8, No 5. P. 334–355. <https://doi.org/10.3390/met8050334>.
13. Coupled electro-Chemical-Soil Model to Evaluate the Influence of Soil Aeration on Underground Metal Pipe Corrosion / R. M. Azoor, R. N. Deo, N. Biribilis, J. K. Kodikara // Corrosion. 2018. Vol. 74, No 11. P. 1177–1191. <https://doi.org/10.5006/2860>.
14. Cole, I. S. The Science of Pipe Corrosion: a Review of the Literature on the Corrosion of Ferrous Metals in Soils / I. S. Cole, D. Marney // Corrosion Science. 2012. Vol. 56. P. 5–16. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.12.001>.
15. Azoor, R. Modelling and Testing of Optimum Soil Moisture Levels in the Corrosion of Underground Pipelines / R. Azoor, R. Deo, J. Kodikara // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 92. P. 16002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199216002>.

16. Corrosion Behavior and Mechanism of X80 Steel in Silty Soil under the Combined Effect of Salt and Temperature / X. Bai, B. He, P. Han [et al.] // RSC Advances. 2022. Vol. 12, No 1. P. 129–147. <https://doi.org/10.1039/d1ra08249c>.
17. Corrosion of API 5L X60 Pipeline Steel in Soil and Surface Defects Detection by Ultrasonic Analysis / F. Benkhedda, I. Bensaid, A. Benmoussat [et al.] // Metals. 2024. Vol. 14, No 4. P. 388. <https://doi.org/10.3390/met14040388>.
18. Electrochemical Corrosion Behaviour of Four Low-Carbon Steels in Saline Soil / G. Qi, X. Qin, J. Xie [et al.] // RSC Advances. 2022. Vol. 12, No 32. P. 20929–20945. <https://doi.org/10.1039/d2ra03200g>.
19. The Mutual Influence Between Corrosion and the Surrounding Soil Microbial Communities of Buried Petroleum Pipelines / H. Su, S. Mi, X. Peng, Y. Han // RSC Advances. 2019. Vol. 9, No 33. P. 18930–18940. <https://doi.org/10.1039/c9ra03386f>.
20. Cervová, J. The Effect of Soil Environment on the Corrosion of Pipeline / J. Cervová, M. Hagarová // Acta Metallurgica Slovaca. 2015. Vol. 21, No 2. P. 102–110. <https://doi.org/10.12776/ams.v21i2.566>.
21. Lin, C. Multi-Phase-Field Modeling of Localized Corrosion Involving Galvanic Pitting and Mechano-Electrochemical Coupling / C. Lin, H. Ruan // Corrosion Science. 2020. Vol. 177. Art. 108900. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108900>.
22. Моделирование процесса коррозионного растрескивания подземных трубопроводов / С. Н. Кутепов, А. Н. Сергеев, А. Е. Гвоздев [и др.] // Чебышевский сборник. 2021. Т. 22, No 5. С. 374–383. <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2021-22-5-374-383>.
23. Yegorchenko, R. Modeling the Corrosive Destruction of Underground Degassing Pipelines / R. Yegorchenko, A. Yavorskyi, P. Dyachkov // Mining Machines. 2024. No 4. P. 220–230.
24. Овчинников, И. Г. Применение программного комплекса ANSYS к расчету толстостенного трубопровода, подвергающегося высокотемпературной локальной водородной коррозии / И. Г. Овчинников, С. А. Бубнов // Известия Саратовского университета. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2011. Т. 11, № 3–2. С. 100–102. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2011-11-3-2-100-102>.
25. Predicting Pipeline Corrosion in Heterogeneous Soils Using Numerical Modelling and Artificial Neural Networks / R. Azoor, R. Deo, B. Shannon [et al.] // Acta Geotechnica. 2021. Vol. 17, No 4. P. 1463–1476. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01385-5>.
26. Chung, N. T. Comparison of Response Surface Methodologies and Artificial Neural Network Approaches to Predict the Corrosion Rate of Carbon Steel in Soil / N. T. Chung, S. R. Choi, J. G. Kim // Journal of The Electrochemical Society. 2022. Vol. 169, No 5. P. 51503. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac700d>.

Поступила 27.12.2024 Подписана в печать 26.02.2025 Опубликовано онлайн 30.05.2025

REFERENCES

1. Strutsky N. V., Romaniuk V. N. (2024) Organization of Electrochemical Protection of Steel Underground Pipelines Against Corrosion in the Gas Distribution Industry of the Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (3), 257–267. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-257-267> (in Russian).
2. Okolelova A. A., Zheltobryukhov V. F., Egorova G. S. (2017) *Ecological Soil Science and the Laws of Ecology*. Volgograd, VSAU-VolgSTU. 216 (in Russian).
3. Fedorchenko V. I. (2009) *Corrosion of Metals*. Orenburg, Orenburg State University. 127 (in Russian).
4. Kuliyeu S. I., Borisevich I. S. (2002) *Physico-chemical Fundamentals of Corrosion Processes*. Vitebsk, Publishing House of VSU Named after P. M. Masherov. 71 (in Russian).
5. Novgorodtseva O. N., Rogozhnikov N. A. (2019) *Corrosion of Metals and Methods of Corrosion Protection*. Novosibirsk, NSTU Publishing House. 162 (in Russian).
6. Perelygin Yu. P., Los' I. S., Kireev S. Yu. (2015) *Corrosion and Corrosion Protection of Metals*. Penza, PSU Publishing House. 88 (in Russian).
7. Maskalenko S. S., Kulikova E. S. (2018) Features of Corrosion of Main Pipelines under the Influence of Land and Soils. *Scientific, Technical and Economic Cooperation of the Countries of Asia-Pacific Region in the 21st Century*. Vol. 1. Khabarovsk, Far Eastern State Transport University, 400–404 (in Russian).

8. State Standard 12536-2014. *Soils. Methods of Laboratory Determination of Granulometric (Grain) and Microaggregate Composition*. Moscow, Standartinform, 2015. 18 (in Russian).
9. Amaya-Gómez R., Bastidas-Arteaga, E., Muñoz F., Sánchez-Silva M. (2021) Statistical Soil Characterization of an Underground Corroded Pipeline Using In-Line Inspections. *Metals*, 11 (2), 292. <https://doi.org/10.3390/met11020292>.
10. Hamilton W. A. (1985) Sulphate-reducing Bacteria and Anaerobic Corrosion. *Annual Review of Microbiology*, 39 (1), 195–217. <https://doi.org/10.1146/annurev.mi.39.100185.001211>.
11. Wasim M., Shoaib S., Mubarak N. M., Asiri A. M. (2018) Factors Influencing Corrosion of Metal Pipes in Soils. *Environmental Chemistry Letters*, 16 (3), 861–879. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0731-x>.
12. Arriba-Rodriguez L.-D., Villanueva-Balsera J., Ortega-Fernandez F., Rodriguez-Perez F. (2018) Methods to Evaluate Corrosion in Buried Steel Structures: A Review. *Metals*, 8 (5), 334–355. <https://doi.org/10.3390/met8050334>.
13. Azoor R. M., Deo R. N., Birbilis N., Kodikara J. K. (2018) Coupled Electro-Chemical-Soil Model to Evaluate the Influence of Soil Aeration on Underground Metal Pipe Corrosion, *Corrosion*, 74 (11), 1177–1191. <https://doi.org/10.5006/2860>.
14. Cole I. S., Marney D. (2012) The Science of Pipe Corrosion: A Review of the Literature on the Corrosion of Ferrous Metals in Soils. *Corrosion Science*, 56, 5–16. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.12.001>.
15. Azoor R., Deo R., Kodikara J. (2019) Modelling and Testing of Optimum Soil Moisture Levels in the Corrosion of Underground Pipelines. *E3S Web of Conferences*, 92, 16002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199216002>.
16. Bai X., He B., Han P., Xie R., Sun F., Chen Z., Wang Y., Liu X. (2022) Corrosion Behavior and Mechanism of X80 Steel in Silty Soil under the Combined Effect of Salt and Temperature. *RSC Advances*, 12 (1), 129–147. <https://doi.org/10.1039/d1ra08249c>.
17. Benkhedda F., Bensaid I., Benmoussat A., Benmansour S. A., Amara Zenati A. (2024) Corrosion of API 5L X60 Pipeline Steel in Soil and Surface Defects Detection by Ultrasonic Analysis. *Metals*, 14 (4), 388. <https://doi.org/10.3390/met14040388>.
18. Qi G., Qin G., Qin X., Xie J., Han P., He B. (2022) Electrochemical Corrosion Behaviour of Four Low-carbon Steels in Saline Soil. *RSC Advances*, 12 (32), 20929–20945. <https://doi.org/10.1039/d2ra03200g>.
19. Su H., Mi S., Peng X., Han Y. (2019) The Mutual Influence Between Corrosion and the Surrounding Soil Microbial Communities of Buried Petroleum Pipelines. *RSC Advances*, 9 (33), 18930–18940. <https://doi.org/10.1039/c9ra03386f>.
20. Cervová J., Hagarova M. (2015) The Effect of Soil Environment on The Corrosion of Pipeline. *Acta Metallurgica Slovaca*, 21 (2), 102–110. <https://doi.org/10.12776/ams.v21i2.566>.
21. Lin C., Ruan H. (2020) Multi-Phase-Field Modeling of Localized Corrosion Involving Galvanic Pitting and Mechano-Electrochemical Coupling. *Corrosion Science*, 177, 108900. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108900>.
22. Kutepov S. N., Sergeev A. N., Gvozdev A. E., Chukanov A. N., Tereshin V. A., Kuzovleva O. V., Tsoi E. V., Krupitsyn E. S. (2021) Modeling of the Process of Corrosion Cracking of Underground Pipelines. *Chebyshevskii Sbornik*, 22 (5), 374–383. <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2021-22-5-374-383> (in Russian).
23. Yegorchenko R., Yavorskyi A., Dyachkov P., Yegorchenko R. (2024) Modeling the Corrosive Destruction of Underground Degassing Pipelines. *Mining Machines*, 41 (4), 220–230.
24. Ovchinnikov I. G., Bubnov S. A. (2011) Application of Program Complex ANSYS to Calculation of the Thick-walled Pipeline which Is Exposed to High-temperature Local Hydrogen Corrosion. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 11 (3), 100–102. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2011-11-3-2-100-102> (in Russian).
25. Azoor R., Deo R., Shannon B., Fu G., Ji J., Kodikara J. (2022) Predicting Pipeline Corrosion in Heterogeneous Soils Using Numerical Modelling and Artificial Neural Networks. *Acta Geotechnica*, 17 (4), 1463–1476. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01385-5>.
26. Nguyen T. Ch., Choi S.-R., Kim J.-G. (2022) Comparison of Response Surface Methodologies and Artificial Neural Network Approaches to Predict the Corrosion Rate of Carbon Steel in Soil. *Journal of the Electrochemical Society*, 169 (5), 051503. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac700d>.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-245-258>

УДК 66.047.7

Температура в периоде падающей скорости сушки тонких плоских капиллярно-пористых влажных материалов

А. И. Ольшанский¹⁾, С. В. Жерносек¹⁾

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

Реферат. Статья посвящена разработке новых способов обработки опытных данных для процессов сушки на основе зависимости безразмерной температуры от обобщенных комплексных переменных, характеризующих наиболее общие закономерности сушки в периоде падающей скорости. В качестве обобщенных комплексных переменных использованы обобщенное время сушки, отношение времени сушки по ее периодам, отношение текущего влагосодержания к критическому. Безразмерный температурный комплекс представляет связь отношения перепада температур в периоде падающей скорости к перепаду температур в периоде постоянной скорости. Рассмотрен метод определения средней температуры из решения нестационарного уравнения теплопроводности для тонких плоских тел на основе критериев Предводителя и Фурье. Для случая нагревания тонкого плоского тела при постоянной температуре среды на основе уравнения баланса теплоты для второго периода сушки дан способ расчета средней температуры с помощью темпа нагрева влажного тела. Представлены методы определения средней температуры для периода падающей скорости сушки на основе комплексных переменных: обобщенного времени сушки и отношения времени сушки по ее периодам. Обработка эксперимента с использованием безразмерного температурного комплекса позволяет определять среднюю температуру материала с учетом влияния на процесс важных характеристик кинетики сушки. Представлена обработка эксперимента на основе температурного коэффициента сушки с использованием экспериментальных температурных кривых. Дана проверка полученных формул на установление точности расчетных значений температуры от экспериментальной температурной кривой. Сопоставление полученных расчетных значений температур с экспериментом дано в таблицах для всех исследуемых материалов.

Ключевые слова: влагосодержание, температура мокрого термометра, коэффициент теплоотдачи, темп нагрева тела, время сушки

Для цитирования: Ольшанский, А. И. Температура в периоде падающей скорости сушки тонких плоских капиллярно-пористых влажных материалов / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 3. С. 245–258. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-245-258>

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

Temperature in the Period of Decreasing Drying Rate of Thin Flat Capillary-Porous Wet Materials

A. I. Ol'shanskii¹⁾, S. V. Zhernosek¹⁾

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

Abstract. The article is devoted to the development of new methods for processing experimental data for drying processes based on the dependence of dimensionless temperature on generalized complex variables characterizing the most general patterns of drying in the period of its rate decreasing. The generalized drying time, the ratio of drying time over drying periods, and the ratio of the current moisture content to the critical one are used as generalized complex variables. The dimensionless temperature complex represents the relationship between the ratio of the temperature difference in the period of rate decreasing and the temperature difference in the period of constant rate. A method for determining the average temperature from the solution of an unsteady heat equation for thin flat bodies based on the Predvoditelev and Fourier criteria is considered. For the case of heating a thin flat body at a constant ambient temperature, a method for calculating the average temperature using the heating rate of a wet body is given based on the heat balance equation for the second drying period. The methods for determining the average temperature for the period of decreasing drying rate are presented; they are based on complex variables, viz. generalized drying time and the ratio of drying time by period. Processing the experiment using a dimensionless temperature complex makes it possible to determine the average temperature of the material, taking into account the influence of important characteristics of drying kinetics on the process. The processing of the experiment based on the temperature coefficient of drying using experimental temperature curves is presented. The obtained formulas are checked to establish the accuracy of the calculated temperature values from the experimental temperature curve. A comparison of the obtained calculated temperature values with the experiment is given in the tables for all the materials under study.

Keywords: moisture content, wet bulb temperature, heat transfer coefficient, body heating rate, drying time

For citation: Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V. (2025) Temperature in the Period of Decreasing Drying Rate of Thin Flat Capillary-Porous Wet Materials. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (3), 245–258. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-245-258> (in Russian)

Введение

Температура материала – важнейший показатель процесса сушки, от величины которого зависят не только структурно-механические и физико-технические, но и технологические свойства материалов, определяющие качество готового продукта [1–5].

В соответствии с технологией сушки важное практическое значение имеет контроль температуры в процессе сушки и длительность ее воздействия на влажный материал [4, 5].

Для тонких материалов при незначительных перепадах температур по сечению влажного тела главным лимитирующим фактором является внешний тепловлагоперенос при взаимодействии поверхности испарения материала с внешней средой. Скорость сушки слабо зависит от внутреннего массопереноса [2, 4–6].

Определение температуры в процессе сушки связано с решением дифференциального уравнения теплопроводности, которое связано с больши-

ми математическими трудностями, поскольку процесс сушки нестационарный и коэффициенты тепло- и влагопереноса находятся в сложной форме зависимости от влагосодержания и температуры [7–9]. Поэтому для вычисления температуры используются эмпирические уравнения на основе экспериментальных исследований процессов сушки и обработки экспериментальных данных с минимальным числом постоянных [1–6, 8, 10–12]. Особенно эффективными являются такие методы обработки опытных данных, которые основаны на наиболее общих закономерностях процесса сушки. К таким методам относятся методы А. В. Лыкова, Г. К. Филоненко, В. В. Красникова, Б. С. Сажина [1–5, 10, 13, 14].

В процессах сушки тонких материалов при малых градиентах температуры тонкого тела термическим переносом вещества можно пренебречь. В отсутствие термического переноса интенсифицируется внешний массоперенос и влага переносится к поверхности материала в виде жидкости [2, 4, 8, 9, 14, 15].

Эксперимент. Вывод формул

Рассмотрим новые способы обработки экспериментальных данных, основанные на зависимости безразмерной температуры от комплексных переменных процесса сушки.

На рис. 1а представлены типичные температурные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ для сушки тонких капиллярно-пористых влажных материалов – войлочной пластины (1), асбестовой пластины (2) и керамической плитки (3). Видно, что по схеме мягкого режима сушки температура в периоде постоянной ее скорости остается постоянной до значения критического влагосодержания $\bar{u}_{кр}$ и равной температуре мокрого термометра $t_{м.т} = t_{п}$ (поверхность влажного тела). При уменьшении влагосодержания $\bar{u} < \bar{u}_{кр}$ процесс сушки протекает в периоде падающей скорости с непрерывным повышением температуры до температуры среды при времени сушки $\tau \rightarrow \infty$ [1–4]. На рис. 1б дана зависимость безразмерной температуры ΔT от времени сушки во втором периоде $\tau_{п}$, отсчитываемом от нуля. Из рис. 1б видно, что температурные кривые образуют экспоненциальные зависимости: для сушки войлока (1), асбеста (2), керамики (3).

Из решения дифференциального уравнения теплопроводности для влажной неограниченной пластины для случая первоначального распределения температуры и влагосодержания при нагреве в среде $t_c = \text{const}$ по закону Ньютона А. В. Лыковым получено уравнение для зависимости безразмерной температуры [7–9]

$$\Delta T = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{м.т}} = f(\exp(Pd \cdot Fo)),$$

где $\bar{t}$ – среднеинтегральная температура в периоде падающей скорости сушки; Pd , Fo – критерии подобия Предводителя и Фурье,

$$Pd = \frac{\beta R_v^2}{a}; \quad Fo = \frac{a\tau_{II}}{R_v^2},$$

β – скорость изменения температуры на поверхности влажного тела;
 a – коэффициент температуропроводности; R_v – отношение объема тела к поверхности (толщина материала).

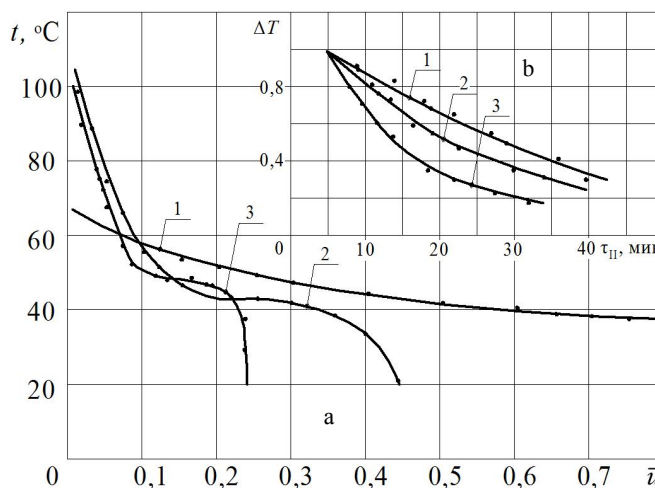


Рис. 1. а – типичные температурные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ для процессов сушки тонких капиллярно-пористых влажных материалов: 1 – войлочная пластина в режиме сушки $t_c = 90$ °C; $v = 3$ м/с; 2, 3 – пластины листового асбеста и керамической плитки для режима сушки $t_c = 120$ °C; $v = 5$ м/с; б – зависимость безразмерной температуры $\Delta T = f(\tau_{II})$ в процессе сушки войлока (1), асбеста (2), керамики (3) в диапазоне режимных параметров сушки: $t_c = 90; 120$ °C; $v = 3; 5$ м/с

Fig. 1. а – typical temperature curves $\bar{t} = f(\bar{u})$ for drying processes of thin capillary-porous wet materials (a): 1 – felt plate in drying mode $t_c = 90$ °C; $v = 3$ m/s; 2, 3 – plates of sheet asbestos and ceramic tiles for drying mode $t_c = 120$ °C; $v = 5$ m/s; б – dependence of dimensionless temperature during the drying process of felt (1), asbestos (2), ceramics (3) in the range of drying parameters: $t_c = 90; 120$ °C; $v = 3; 5$ m/s

Произведение критериев определяется соотношением

$$Fo \cdot Pd = \frac{a\tau_{II}}{R_v^2} \cdot \frac{\beta R_v^2}{a} = \beta\tau_{II}.$$

Для безразмерной температуры можно записать

$$\Delta T = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{м.т}} = \exp(-\beta\tau_{II}). \quad (1)$$

В случае нагревания тонкого плоского влажного тела при температуре $t_c = \text{const}$ и равномерном начальном распределении температуры внут-

ри тела с градиентом температуры в середине пластины, равным нулю, уравнение теплового баланса для периода падающей скорости сушки имеет вид [7, 8, 16]

$$c_{\text{вл}} \rho R_V \frac{d\bar{t}}{d\tau} = \bar{\alpha} (t_c - \bar{t}), \quad (2)$$

где $c_{\text{вл}}$ – удельная теплоемкость влажного тела; ρ – плотность тела; $d\bar{t}/d\tau$ – скорость нагрева тела; $\bar{\alpha}$ – коэффициент теплообмена.

Интегрированием уравнения (2) получим

$$\Delta T = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{\text{м.т}}} = \exp\left(-\frac{\bar{\alpha}}{c_{\text{вл}} \rho R_V} \tau_{\text{II}}\right). \quad (3)$$

Многие исследования [8, 9, 16] показали, что комплекс $\bar{\alpha}/(c_{\text{вл}} \rho R_V)$ – величина постоянная, которая не зависит от режима сушки и определяется родом материала [1, 7, 9, 15].

Комплекс

$$\frac{\bar{\alpha}}{c_{\text{вл}} \rho R_V} = m_i \quad (4)$$

представляет темп нагревания влажного тела [1, 7, 9, 15].

Подставляя (4) в (3), получим уравнение для средней температуры материала в периоде падающей скорости сушки [17]

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{\text{м.т}}) \exp(-m_i \tau_{\text{II}}).$$

На основании (1), (3) и (4) можно записать

$$\beta \tau_{\text{II}} = m_i \tau_{\text{II}}. \quad (5)$$

Обработкой опытных данных по сушке пористой керамики, листового асбеста, шерстяного войлока получено приближенное выражение для темпа нагревания влажного материала [16, 17]

$$m_i = 0,105 \exp(-2\bar{u}_{\text{кр}}).$$

Из экспоненциальных температурных кривых $\Delta T = f(\tau_{\text{II}})$ (рис. 1b) методом наименьших квадратов установлено значение постоянной β для сушки войлока, асбеста, керамики. Значения β для материалов даны в табл. 1.

Среднеинтегральная температура находится из уравнения (1)

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{\text{м.т}}) \exp(-\beta \tau_{\text{II}}). \quad (6)$$

Таблица 1

Значения коэффициентов в расчетных формулах
Values of coefficients in calculation formulas

Материал	m	m_0	β	n	n_0	D_0
Керамическая плита	10,0	4,50	0,09	10	17,0	$1450 - 520\bar{u} / \bar{u}_{кр}$
Листовой асбест	5,5	1,72	0,05	5	12,0	$970 - 410\bar{u} / \bar{u}_{кр}$
Шерстяной войлок	0,45	0,55	0,02	1	2,5	$395 - 285\bar{u} / \bar{u}_{кр}$

На рис. 2а дана зависимость $\Delta T = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$, а на рис. 2б $\Delta T = f(\bar{u}_{кр} - \bar{u})$. Зависимости $\Delta T = f(\bar{u}_{кр} - \bar{u})$ с достаточной точностью аппроксимируются экспоненциальными зависимостями для керамики (1), асбеста (2), войлока (3). Зависимости $\Delta T = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$ представляют линейные зависимости для данных материалов.

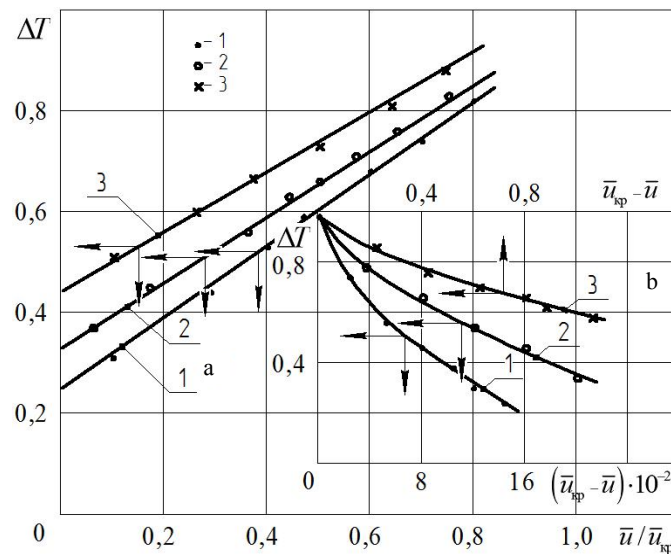


Рис. 2. а – зависимость $\Delta T = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$ для процесса сушки; б – то же $\Delta T = f(\bar{u}_{кр} - \bar{u})$;
1 – керамика; 2 – асбест, 3 – войлок (режимы сушки даны на рис. 1)

Fig. 2. а – dependencies $\Delta T = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$ for the drying process; б – the same $\Delta T = f(\bar{u}_{кр} - \bar{u})$;
1 – ceramics; 2 – asbestos, 3 – felt (drying modes are shown in Fig. 1)

Уравнения температурных кривых имеют вид

$$\Delta T = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{м.т}} \exp(-m(\bar{u}_{кр} - \bar{u})). \quad (7)$$

Среднеинтегральная температура определяется уравнением

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{m.T}) \exp(-m(\bar{u}_{кр} - \bar{u})), \quad (8)$$

где m – константа, определяемая опытным путем.

В результате обработки экспериментальных данных получена зависимость $\Delta T = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$ для сушки керамики, асбеста и войлока, представляющая собой линейную функцию отношения влагосодержаний

$$\Delta T = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{m.T}} = 0,65\bar{u} / \bar{u}_{кр} + 0,35. \quad (9)$$

Анализ уравнения (9) показывает, что при отношении $\bar{u} / \bar{u}_{кр} = 1$, которое является границей перехода первого периода сушки во второй период, температура совпадает с температурой материала $\bar{t} = t_{m.T}$. При равновесном влагосодержании ($\bar{u} = u_p$) из безразмерного температурного комплекса следует $\Delta T = 0,35$ и $\bar{t} < t_c$, что не соответствует физическому характеру протекания процесса сушки. Уравнение (9) выполняется только при $\bar{u} / \bar{u}_{кр} > 0,1$, что соответствует конечным значениям влагосодержания материала. Величины постоянной m в уравнении (7) для исследуемых материалов приведены в табл. 1.

Анализ результатов исследований кинетики сушки разных капиллярно-пористых материалов с использованием различных методов обработки экспериментальных данных показал, что при любом режиме сушки сохраняется неизменной величина произведения $N \tau_{II}$ для данного влагосодержания [1–6]. Переменная $N \tau_{II}$, где N – скорость сушки в первом периоде, является устойчивым комплексом переменных и получила название обобщенного времени сушки [1, 3, 4]. Это заключение является следствием, вытекающим из обобщенной кривой кинетики сушки Г. К. Филоненко [13]. На рис. 3 даны температурные кривые $\Delta T = f(N \tau_{II})$ для сушки керамики (1), асбеста (2) и войлока (3). Среднеинтегральная температура вычисляется как функция $N \tau_{II}$

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{m.T}) \exp(-m_0 N \tau_{II}). \quad (10)$$

Значения постоянной m_0 даны в табл. 1.

Зависимость для безразмерной температуры ΔT от отношения времени сушки по периодам τ_{II} / τ_I представлена на рис. 4. Температурные кривые выражаются уравнением [17]

$$\Delta T = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{m.T}} = \exp\left(-\psi \frac{\tau_{II}}{\tau_I}\right). \quad (11)$$

Среднеинтегральная температура определяется выражением

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{m.T}) \exp\left(-\psi \frac{\tau_{II}}{\tau_I}\right). \quad (12)$$

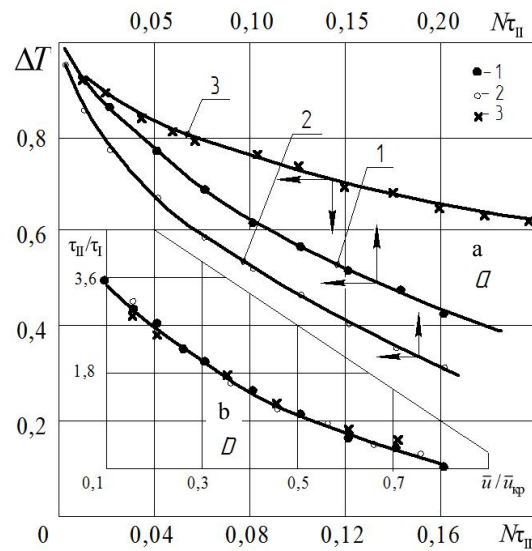


Рис. 3. а – зависимость безразмерной температуры $\Delta T = f(N\tau_{II})$ для процесса сушки керамики (1), асбеста (2) и войлока (3); б – зависимость отношения времени сушки по периодам τ_{II}/τ_I от отношения влагосодержаний $\bar{u}/\bar{u}_{кр}$ (режимы даны на рис. 1)

Fig. 3. a – dependences of dimensionless temperature $\Delta T = f(N\tau_{II})$ (a) for the drying process of ceramics (1), asbestos (2) and felt (3); b – dependence of the drying time ratio by period τ_{II}/τ_I on the moisture content ratio $\bar{u}/\bar{u}_{кр}$ (b) (the modes are shown in Fig. 1)

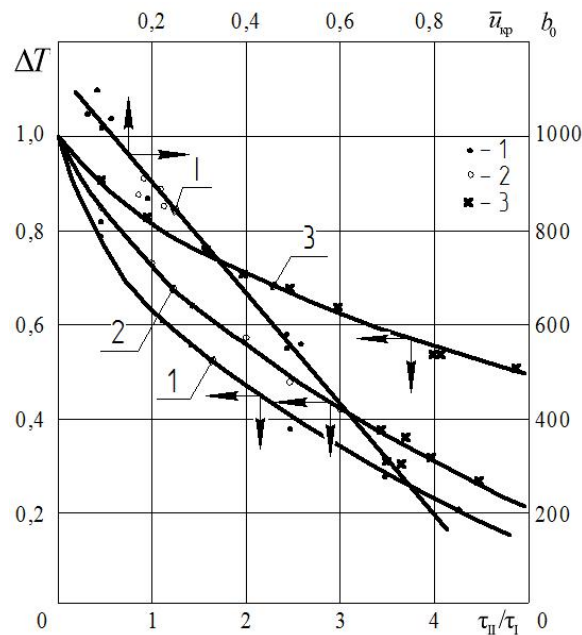


Рис. 4. Зависимости безразмерной температуры ΔT от отношения времени сушки по периодам τ_{II}/τ_I для процессов сушки: керамики (1), асбеста (2) и войлока (3); зависимость коэффициента $b_0 = f(\bar{u}_{кр})$ (прямая I): 1 – керамика; 2 – асбест; 3 – войлок; 4 – картон (режимы сушки даны на рис. 1)

Fig. 4. Dependences of dimensionless temperature ΔT on the ratio of drying time by period τ_{II}/τ_I for the drying process of ceramics (1), asbestos (2) and felt (3); dependence of the coefficient $b_0 = f(\bar{u}_{кр})$ (straight line I): 1 – ceramics; 2 – asbestos; 3 – felt; 4 – cardboard (drying modes are shown in Fig. 1)

В результате обработки опытных данных сушки керамики, асбеста и войлока получено общее для всех материалов значение коэффициента $\psi = 0,4$.

Представлена обработка экспериментальных данных для зависимости отношения τ_{II} / τ_I от отношения влагосодержаний $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$ (рис. 3b). Видно, что для исследуемых материалов все опытные точки с достаточной точностью описываются экспоненциальными кривыми. Уравнение имеет вид [16]

$$\frac{\tau_{II}}{\tau_I} = 3,7 \exp \left(-2,5 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right). \quad (13)$$

В табл. 2 даны значения длительности сушки, вычисленные по формуле (9), для сушки керамической пластины и листового асбеста при $t_c = 120^\circ\text{C}$, $v = 5 \text{ м/с}$.

Таблица 2

Длительность сушки во втором периоде для процесса сушки керамики и асбеста при $t_c = 120^\circ\text{C}$, $v = 5 \text{ м/с}$, $\phi = 5\%$

Drying duration in the second period for the drying process of ceramics and asbestos at a drying mode of $t_c = 120^\circ\text{C}$, $v = 5 \text{ м/с}$, $\phi = 5\%$

Керамическая пластина							
$\bar{u}$	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,02	0,01
$\bar{u} / \bar{u}_{кр}$	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,2	0,1
τ_{II} , мин расч.	3,1	3,8	4,8	6,6	8,4	13,9	20,9
τ_{II} , мин эксп.	3,0	3,7	4,5	6,5	8,0	14,5	21,5
Асбестовая пластина							
$\bar{u}$	0,16	0,14	0,12	0,10	0,08	0,04	0,02
$\bar{u} / \bar{u}_{кр}$	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,2	0,1
τ_{II} , мин расч.	4,0	4,4	7,8	8,5	11,6	18,7	24,2
τ_{II} , мин эксп.	3,0	4,5	6,5	9,0	11,0	18,0	23,5

В расчеты по кинетике сушки А. В. Лыковым введены температурный коэффициент сушки $b = d\bar{t} / d\bar{u}$ и безразмерный температурный коэффициент сушки B , определяемый соотношением [1, 4, 15, 16]

$$B = b \frac{\Delta \bar{u}}{\Delta T} = b \frac{\bar{u}_{кр}}{T_c}. \quad (14)$$

Величина температурного коэффициента сушки $b = d\bar{t} / d\bar{u}$ определяет повышение средней температуры материала в процессе сушки и является важной характеристикой кинетики сушки [1–4]. Величина b является функцией интегрального влагосодержания $b = f(\bar{u})$ и находится графическим дифференцированием температурной кривой $\bar{t} = f(\bar{u})$ (рис. 1).

Зависимости $B = f(\bar{u})$ и $b = f(\bar{u})$ для ряда влажных материалов выражаются эмпирическими формулами [1–4, 16–18]:

$$B = a \exp(-m_1(\bar{u} - \bar{u}_p)); \quad (15)$$

$$b = \frac{d\bar{t}}{d\bar{u}} = D_0 \exp(-n(\bar{u} - \bar{u}_p)); \quad (16)$$

$$b = \frac{d\bar{t}}{d\bar{u}} = b_0 \exp(-n_0(\bar{u} - \bar{u}_p)). \quad (17)$$

Постоянные a , m_1 , b_0 , D_0 , n , n_0 определяются экспериментально. Используя эмпирические формулы, можно получить приближенные уравнения температурной кривой и определить среднюю температуру материала $\bar{t}$.

Для средней температуры $\bar{t}$ в периоде падающей скорости сушки можно записать уравнения [3, 16–18]:

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

$$\bar{t}(\bar{u}) = \int b(\bar{u}) d\bar{u} + C_1; \quad (18)$$

$$\bar{t}(\bar{u}) = t_c - \int b(\bar{u}) d\bar{u} + C_2. \quad (19)$$

Произвольные постоянные C_1 , C_2 вычисляются из условий на границе температур t_c и $t_{м.т}$ [4, 8, 9, 16].

Для определения средней температуры $\bar{t}$ воспользуемся формулами (16) и (17). Подставляя в (18) и (19) формулы (16) и (17) и интегрируя в пределах, задаваемых постоянными C_1 и C_2 , получим уравнения температурной кривой [3, 10, 15, 16]:

$$\bar{t} = t_{м.т.} + \frac{b_0}{n_0} \exp(\bar{u} - \bar{u}_p); \quad (20)$$

$$\bar{t} = t_c - \frac{D_0}{n} [1 - \exp(-n(\bar{u} - \bar{u}_p))]. \quad (21)$$

На рис. 5 даны зависимости температурного коэффициента сушки $\lg b = f(\bar{u})$ для керамики (1), асбеста (2), войлока (3), полученные графическим дифференцированием температурных кривых $\bar{t} = f(\bar{u})$ (рис. 1).

Обработка опытных данных по сушке керамики, асбеста, войлока показала, что значение коэффициента D_0 в уравнении (21) описывается линей-

ной функцией отношения $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$. Графическая зависимость $D_0 = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$ дана на рис. 5. Процесс сушки керамики характеризует прямая I, асбеста – II, войлока – III. Параметры линейных зависимостей $D_0 = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$ приведены в табл. 1.

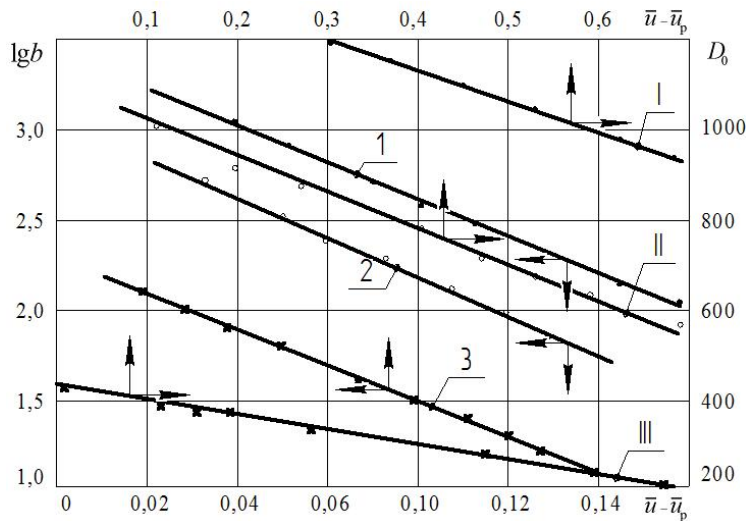


Рис. 5. а – зависимость температурного коэффициента сушки $\lg b$ от влагосодержания $\bar{u} - \bar{u}_p$ для процесса сушки: керамики (1), асбеста (2) и войлока (3);
 б – зависимость коэффициента $D_0 = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$: I – керамика; II – асбест; III – войлок
 (режимы сушки даны на рис. 1)

Fig. 5. а – dependences of the drying temperature coefficient $\lg b$ on moisture content $\bar{u} - \bar{u}_p$ for the drying process of ceramics (1), asbestos (2) and felt (3);
 б – dependence of coefficient $D_0 = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$: I – ceramics; II – asbestos; III – felt (drying modes are shown in Fig. 1)

Коэффициент b_0 в уравнении (20) является функцией критического влагосодержания $\bar{u}_{кр}$ и приближенно аппроксимируется одним уравнением для всех рассматриваемых материалов [15–17]

$$b_0 = 10^3 (1,13 - 1,3\bar{u}_{кр}). \quad (22)$$

На рис. 4 дана зависимость $b_0 = f(\bar{u}_{кр})$ (прямая I). Значения постоянных n и n_0 приведены в табл. 1.

В табл. 3 даны проверка полученных формул и сопоставление расчетных значений температуры с экспериментальными. Погрешность между расчетными и экспериментальными значениями находится в пределах точности проведения эксперимента.

Таблица 3

Экспериментальные и расчетные значения среднеинтегральных температур для процессов сушки керамической плитки, листового асбеста и шерстяного войлока
Experimental and calculated values of average integral temperatures for drying processes of ceramic tiles, sheet asbestos and wool felt

Керамическая пористая плитка 120×80×5 мм; $\rho_0 = 1860 \text{ кг/м}^3$. Режим сушки: $t_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 3 \text{ м/с}$; $\varphi = 5 \%$; $\bar{u}_0 = 0,2$; $\bar{u}_{кр} = 0,1$; $N = 0,015 \text{ мин}^{-1}$; $t_{м.т} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $\tau_1 = 6 \text{ мин}$										
$\bar{u}$	$\bar{u} / \bar{u}_{кр}$	$\tau_{II}, \text{ мин}$ экс	$\bar{t}, \text{ }^\circ\text{C}$ экс	$\bar{t}, \text{ }^\circ\text{C}$ (6)	$\bar{t}, \text{ }^\circ\text{C}$ (8)	$\bar{t}, \text{ }^\circ\text{C}$ (10)	$\bar{t}, \text{ }^\circ\text{C}$ (12)	$\bar{t}, \text{ }^\circ\text{C}$ (3)	$\bar{t}, \text{ }^\circ\text{C}$ (20)	$\bar{t}, \text{ }^\circ\text{C}$ (21)
0,08	0,8	3,0	64,0	63,0	63,5	65,0	65,0	64,5	64,0	63,5
0,06	0,6	4,5	72,0	73,5	69,8	72,0	75,0	73,5	72,0	72,8
0,04	0,4	8,0	83,0	81,5	81,7	83,5	82,5	84,4	80,5	81,5
0,02	0,2	14,5	94,0	92,4	93,4	96,4	93,4	95,0	92,4	95,0
0,01	0,1	21,5	103,0	102,0	103,0	103,0	105,0	104,0	105,0	104,0
Листовой асбест 180×100×6 мм; $\rho_0 = 770 \text{ кг/м}^3$. Режим сушки: $t_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 5 \text{ м/с}$; $\varphi = 5 \%$; $\bar{u}_0 = 0,46$; $\bar{u}_{кр} = 0,2$; $N = 0,028 \text{ мин}^{-1}$; $t_{м.т} = 42 \text{ }^\circ\text{C}$; $\tau_1 = 8,5 \text{ мин}$										
0,16	0,80	3,0	52,0	53,5	51,3	51,5	50,5	53,2	52,0	52,5
0,14	0,70	4,5	54,0	56,4	56,2	56,0	54,5	55,0	54,0	56,7
0,12	0,60	6,5	62,0	63,5	61,0	62,5	60,6	63,4	60,0	62,4
0,08	0,40	11,0	72,0	74,4	70,5	74,0	73,0	71,4	70,0	73,6
0,04	0,20	18,0	84,0	84,3	84,5	85,4	86,4	84,3	85,0	81,8
0,02	0,10	23,0	91,0	89,7	89,6	93,6	94,2	92,0	94,0	89,4
0,01	0,05	34,0	103,0	102,0	103,0	103,0	103,0	103,0	104,0	102,0
Шерстяной войлок 180×120×8 мм; $\rho_0 = 180 \text{ кг/м}^3$. Режим сушки: $t_c = 90 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 5 \text{ м/с}$; $\varphi = 6 \%$; $\bar{u}_0 = 1,14$; $\bar{u}_{кр} = 0,75$; $N = 0,047 \text{ мин}^{-1}$; $t_{м.т} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$; $\tau_1 = 8,0 \text{ мин}$										
0,6	0,80	4,5	42,0	40,0	42,5	41,5	40,5	41,5	43,5	42,0
0,5	0,67	8,0	45,0	43,5	44,5	45,0	44,6	45,0	46,3	44,6
0,4	0,53	11,0	50,0	48,5	50,0	48,6	48,7	48,5	49,2	51,2
0,3	0,40	16,5	53,0	51,6	54,5	52,4	53,0	53,5	51,9	53,4
0,2	0,27	21,5	57,0	56,3	58,6	57,4	57,5	56,4	58,0	58,4
0,1	0,13	38,4	67,0	—	68,0	65,4	66,2	65,8	62,2	69,0

ВЫВОДЫ

1. Предложен метод определения среднеинтегральной температуры на основе результатов решения нестационарного уравнения теплопроводности для тонких плоских влажных тел.
2. Разработан способ определения средней температуры на основе элементов теории регулярного режима.
3. Дан метод определения средней температуры на основе комплексных переменных процесса сушки: обобщенного времени сушки и отношения

времени сушки по периодам. Приведен анализ погрешности расчета значений средней температуры с помощью полученных формул.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1968. 472 с.
2. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. Минск: Белорус. наука, 2010. 443 с.
3. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. М.: Энергия, 1973. 288 с.
4. Сажин, Б. С. Научные основы техники сушки / Б. С. Сажин, В. Б. Сажин. М.: Наука, 1997. 447 с.
5. Рудобашта, С. П. Теплотехника / С. П. Рудобашта. 2-е изд., доп. М.: Перо, 2015. 672 с.
6. Васильев, В. Н. Технология сушки. Основы тепло- и массопереноса: учеб. / В. Н. Васильев, В. Е. Куцакова, С. В. Фролов. СПб.: ГИОРД, 2013. 222 с.
7. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. М.: Высш. шк., 1967. 599 с.
8. Лыков, А. В. Теоретические основы строительной теплофизики. Минск: Изд-во АН БССР, 1961. 519 с.
9. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. 535 с.
10. Куц, П. С. Некоторые закономерности тепловлагообмена и приближенные методы расчета кинематики процесса сушки влажных материалов / П. С. Куц, А. И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. 1977. Т. 32, № 6. С. 1007–1014.
11. Рабинович, Г. Д. Новый метод расчета конвективной сушки тонких материалов / Г. Д. Рабинович // Инженерно-физический журнал. 1966. Т. 32, № 2. С. 182.
12. Ольшанский, А. И. Регулярный тепловой режим и влияние критериев подобия тепло-массообмена на процесс конвективной сушки пористой керамики / А. И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. 2016. Т. 89, № 1. С. 37–48.
13. Филоненко, Г. К. Сушильные установки / Г. К. Филоненко, П. Д. Лебедев. М.: Энергоиздат, 1952. 263 с.
14. Лыков, А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах / А. В. Лыков. М.: Гос. изд-во техн.-теоретич. лит., 1954. 296 с.
15. Ольшанский, А. И. Исследование сушки тонких материалов с использованием обобщенных комплексных переменных / А. И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. 2016. Т. 89, № 4. С. 884–894.
16. Ольшанский, А. И. Исследование тепломассообмена в процессах тепловой обработки и сушки теплоизоляционных материалов = Investigation of Heat and Mass Transfer in the Processes of Heat Treatment and Drying of Thermal Insulation Materials / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. № 2. С. 156–168.
17. 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 // Инженер.-физ. журн. 2017. Т. 90, № 3. С. 700–713.

Поступила 14.11.2024 Подписана в печать 16.01.2025 Опубликовано онлайн 30.05.2025

REFERENCES

1. Lykov A. V. (1968) *Drying Theory*. Moscow, Energiya Publ. 472 (in Russian).
2. Akulich P. V. (2010) *Calculations of Drying and Heat Exchange Installations*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ. 443 (in Russian).
3. Krasnikov V. V. (1973) *Conductive Drying*. Moscow, Energiya Publ. 288 (in Russian).

4. Sazhin B. S. (1984) *Scientific Fundamentals of Drying Technique*. Moscow, Khimiya Publ. 320 (in Russian).
5. Rudobashta S. P. (2015) *Thermal Engineering*. Moscow, Pero Publ. 672 (in Russian).
6. Vasiliev V. N., Kutsakova V. E., Frolov S. V. (2013) *Drying Technology. Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. St. Petersburg, GIOR Publ. 222 (in Russian).
7. Lykov A. V. (1967) *Theory of Heat Conductivity*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 599 (in Russian).
8. Lykov A. V. (1961) *Theoretical Foundations of Construction Thermal Physics*. Minsk, Publishing House of the Academy of Sciences of the BSSR. 519 (in Russian).
9. Lykov A. V., Mikhaylov Y. A. (1963) *Theory of Heat and Mass Transfer*. Moscow–Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 535 (in Russian).
10. 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>.
11. Rabinovich G. D. (1966) Calculation of Radiative-Convective Recuperators. *Journal of Engineering Physics*, 10, 140–143.
12. 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>.
13. Filonenko G. K., Lebedev P. D. (1952) *Drying Plants*. Moscow, Energia Publ. 263 (in Russian).
14. Lykov A. V. (1954) *The Phenomena of Transfer in Capillary-Porous Bodies*. Moscow, The State Publishing House of the Technical-Theoretical Literature. 296 (in Russian).
15. Ol'shanskii A. I. (2016) Investigation of the Drying of Thin Materials with the Use of Generalized Complex Variables. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 89 (4), 886–895. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1450-4>.
16. Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V., Gusarov A. M. (2022) Investigation of Heat and Mass Transfer in the Processes of Heat Treatment and Drying of Thermal Insulation Materials. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (2), 156–168. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-156-168> (in Russian).
17. 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>.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-259-273>

УДК 628-385

Аналитическое решение математической модели анаэробного брожения в проточном биореакторе при производстве биогаза

В. А. Седнин¹⁾, П. П. Храмцов¹⁾, Н. А. Седнин¹⁾

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

Реферат. В статье рассмотрены современное состояние и перспективы развития технологий производства биогаза (биометана) при утилизации органических отходов. Актуальность проблемы определяется тем, что опыт эксплуатации биогазовых комплексов в условиях Республики Беларусь при генерации биогаза только из органических отходов показал низкую экономическую эффективность. В то же время решение важной задачи по утилизации производственных и бытовых отходов с одновременным получением энергетического ресурса и органического удобрения является не только необходимым, но и привлекательным результатом как с экологической, так и энергетической стороны. Состояние данной проблемы за рубежом показывает наличие потенциала для развития биотехнологий в нашей стране как в технологическом, так и в системно-конструктивном оформлении биогазовых комплексов. Реализация этого потенциала на практике предполагает наличие у разработчиков адекватного математического аппарата, описывающего процессы переноса в биореакторах. Приводится аналитическое решение математической модели процесса сбраживания органических отходов, которое предполагается использовать для исследования процессов переноса в биотенках проточного типа при конструировании гибридных энерготехнологических систем генерации биогаза с применением альтернативных источников энергии. Показано, что выбранная для исследования математическая модель и полученное ее аналитическое решение достаточно хорошо согласовываются с известными эмпирическими зависимостями, полученными для описания непрерывного режима работы проточного биореактора, и находятся в хорошем соответствии с результатами численных расчетов аналитических моделей целого ряда других исследователей. Данное аналитическое решение позволяет определять характерные зависимости темпа производства биогаза, динамику скорости его генерации, изменения концентрации питательного вещества, усвояемого бактериями, и концентрации бактерий в биореакторе проточного типа в зависимости от скорости подачи питательных веществ в биореактор. Полученные решения в дальнейшем предполагается использовать при синтезе алгоритмов управления разрабатываемой многосырьевой гибридной энерготехнологической системой для генерации и обогащения биогаза проточно-накопительного типа с использованием альтернативных источников энергии.

Ключевые слова: анаэробное сбраживание, биогаз, биотенки проточного типа, возобновляемые источники энергии, декарбонизация, интегрированные системы, математическая модель, многостадийный процесс, непрерывный режим, переработка отходов, управление

Для цитирования: Седнин, В. А. Аналитическое решение математической модели анаэробного брожения в проточном биореакторе при производстве биогаза / В. А. Седнин, П. П. Храмцов, Н. А. Седнин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 3. С. 259–273. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-259-273>

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

Analytical Solution of the Mathematical Model of Anaerobic Fermentation in a Flow Bioreactor for Biogas Production

V. A. Sednin¹⁾, P. P. Khramsov¹⁾, N. A. Sednin¹⁾

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

Abstract. The article briefly considers the current state and prospects for the development of biogas (biomethane) production technologies during organic waste recycling. The relevance of the problem is determined by the fact that the experience of operating biogas complexes in the conditions of the Republic of Belarus during biogas generation only from organic waste has shown low economic efficiency. At the same time, solving the important task of recycling industrial and household waste while simultaneously obtaining an energy resource and organic fertilizer is not only necessary, but also an attractive result from both the environmental and energy production points. The state of this problem abroad shows the presence of potential for the development of biotechnology in our country both in the technological and in the system-constructive design of biogas complexes. The implementation of this potential in practice presupposes that the developers have an adequate mathematical apparatus describing the transfer processes in bioreactors. An analytical solution of the mathematical model of the organic waste fermentation process is given, which is supposed to be used to study the transfer processes in flow-type biotanks when designing hybrid energy-technological systems for biogas generation using alternative energy sources. It is shown that the mathematical model obtained as a result of the analytical review for the study is in good agreement with the empirical data obtained to describe the continuous operation of a flow-through bioreactor, and is in good agreement with the results of numerical calculations of analytical models by a number of other researchers. This analytical solution makes it possible to determine the characteristic dependences of the biogas production rate, the dynamics of its generation rate, changes in the concentration of nutrient absorbed by bacteria, and the concentration of bacteria in a flow-type bioreactor depending on the rate of nutrient supply to the bioreactor. The obtained solutions are expected to be used in the synthesis of control algorithms for the developed multi-resource hybrid energy technology system for generating and enriching biogas of a flow-storage type using alternative energy sources.

Keywords: anaerobic digestion, biogas, flow-type biotanks, renewable energy sources, decarbonization, integrated systems, mathematical model, multistage process, continuous mode, waste treatment, control

For citation: Sednin V. A., Khramsov P. P., Sednin N. A. (2025) Analytical Solution of the Mathematical Model of Anaerobic Fermentation in a Flow Bioreactor for Biogas Production. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (3), 259–273. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-259-273> (in Russian)

Введение

Рост и накопление органических отходов в процессе человеческой деятельности в производстве и быту вызывают серьезную экологическую проблему. Одним из подходов к решению этой проблемы является метанизация этих отходов с применением биогазовых технологий. Однако сегодня в условиях Республики Беларусь производство биогаза далеко не всегда экономически оправдано, хотя, несомненно, является предпочтительным с экологической точки зрения, особенно при переработке постоянного потока отходов. Перспективность биогазовых технологий объясняется и тем, что они занимают особое место среди возобновляемых источников энер-

гии (ВИЭ) из-за экологической чистоты в отличие от разрекламированных кампаний использования солнечной и ветровой энергии [1, 2].

По данным [3], полноценное использование биогаза может привести к сокращению глобальных выбросов парниковых газов на 10–13 % и обеспечить утилизацию бытовых и производственных отходов. При этом биогазовые технологии являются важнейшим источником производства энергии. Растущий спрос на биогаз в мировом масштабе энергетического сектора привел к значительному росту установленной мощности по его производству, которая в 2024 г. достигла 21,4 ГВт. Таким образом, это имеет важное значение из-за существующих экологических проблем, ограниченных запасов нефти и энергетической безопасности [4].

В период с 2010 по 2020 г. в Европе наблюдался значительный рост строительства биогазовых установок. Так, по состоянию на 2021 г., их действующее количество достигло 19 тыс., общая установленная мощность более тысячи из которых составляла 167 ТВт·ч [5], а суммарное производство – около 21 млрд м³ биогаза и биометана. Предполагается, что к 2030 г. производство увеличится 1,5–2 раза, а к 2050 г. – в восемь раз. По данным Международного энергетического агентства [6], общее мировое производство биотоплива составило в 2018 г. почти 154 млрд м³. Лидерами по производству биогаза в Европе являются Германия, Чехия, Великобритания, Италия и Франция.

В последние десятилетия исследованию технологических процессов метанового брожения, конструирования и проектирования биогазовых комплексов посвящено значительное количество научных работ российских и зарубежных ученых [7–18]. Сравнительный анализ технико-экономических показателей биогазовых комплексов ведущих мировых производителей свидетельствует, что наилучшие показатели по скорости сбраживания (времени, требуемого для процесса сбраживания для заданной полноты разложения органических отходов) достигнуты на установках фирм «Колорадо биогаз» (США), «Липп» (ФРГ), «Биосистем» (Швеция) и «Клаухан» (Дания) [1, 13–23]. Выделяют два направления развития в конструировании реакторов: крупные вертикальные метантенки, собираемые на месте, и модульные горизонтальные. В лучших установках достигнута экспозиция сбраживания 11–12 сут. благодаря введению предобработки сбраживаемой массы в предкамере, организации многостадийности за счет применения секционной конструкции реактора, создаваемой поперечными перегородками. И те и другие типы установок имеют свои преимущества и недостатки, что указывает на потенциальные возможности совершенствования существующих и создания новых типов конструкций биогазовых установок и требует дальнейшего исследования процессов сбраживания [24, 25].

Таким образом, несмотря на многочисленные исследования процессов синтеза биогаза и успехи в их практической реализации, основные закономерности и механизмы отдельных стадий брожения изучены недостаточно [1]. Тем не менее технология процесса генерации биогаза пока не полу-

чила своего точного математического описания, хотя исследователями предложен целый ряд зависимостей, описывающих кинетику процесса [8]. Исследование технологии производства биогаза в инновационных многоступенчатых схемах [7] требует владения математическим аппаратом, детально описывающим процессы биомеханического брожения, с учетом основных факторов, определяющих производительность биогазовых установок: температуры процесса, значения pH , скорости загрузки суспензий и т. д. [1].

Для представления в математическом описании процесса генерации биогаза чаще всего используют приближенные модели, отражающие удельную скорость роста микроорганизмов в виде функции от концентрации субстрата. Так, в ряде работ [7–10, 14, 15] представлено существенное множество математических моделей, в которых сделаны попытки описать различные биотехнологические процессы, в том числе и метаногенез, что позволяет судить об отсутствии единой универсальной модели, охватывающей широкий круг процессов сбраживания, отличающихся исходным составом стока, условиями сбраживания, конструкцией биореактора. На практике чаще используют простейшие модели, например линейную модель Кобозева [9], связывающую скорость реакции через константу скорости, либо модель Моно [8, 16]. В рассмотренных литературных источниках не найдены аналитические решения подобных моделей, как правило, представлены численные решения, которые, как известно, характеризуют исследуемые процессы больше качественно. Тем не менее представленные в [9, 11, 26–28] результаты численных экспериментов достаточно точно описывают основные закономерности процесса анаэробного сбраживания отходов животноводства, растениеводства, органических бытовых отходов, а также специально выращиваемой быстрорастущей биомассы. Однако ввиду громоздкости вычислений численные методы реализации моделей в частных производных мало пригодны к применению в системах автоматизированного управления. Аппроксимация численных решений с применением методов планирования эксперимента может выступать как альтернатива аналитическому решению, но при этом не отражается физика исследуемого процесса и не всегда удается достигнуть требуемой точности решения, что делает актуальным получение аналитического решения.

За основу для получения аналитического решения нами принята «системно-динамическая модель технологического процесса производства биогаза из растительного сырья», представленная в [18], особенностью которой является учет неоднородности сырья из-за возможности в реальных условиях земледелия использовать для генерации биогаза отходы от производства различных растений. Таким образом, обеспечивается возможность включения в состав и подачи в биореактор исходного субстрата, состоящего из любой комбинации отходов растениеводства и побочных продуктов сельскохозяйственной деятельности. А именно это [18]: «растительные остатки традиционных пищевых посевов (солома), качественная биомасса специально выращиваемых культур энергетического назначения

с большим содержанием лабильных сахаров и низкокалорийные и трудно-разлагаемые побочные продукты вспомогательных производств (например, древесные опилки)» и т. п. [18]. Поэтому математическая модель разрабатывалась с учетом различной энергетической ценности и скорости разложения отдельных компонентов вышеуказанной сырьевой базы.

Важным аспектом математической модели [18], которая была нами принята для получения аналитического решения, является требование применения полученного решения задачи к определению состава и параметров исходного субстрата для обеспечения нужных характеристик биогаза на выходе из реактора. Таким образом, появляется возможность нахождения оптимальных режимов технологического процесса переработки, имеющихся в распоряжении органических отходов с формированием состава исходного субстрата согласно требованиям к качеству и выходу биогаза. Получение аналитического решения значительно упрощает впоследствии проведение параметрической оптимизации технологического процесса с варьированием параметров, анализом чувствительности и прочих характеристик.

Отличительной чертой рассматриваемых процессов сбраживания является жесткая взаимосвязь роста популяции микробов и выхода метана, ввиду того что последний является сопутствующим продуктом в ходе потребления микробами летучих жирных веществ. Поэтому математическая модель должна учитывать все стадии жизненного цикла роста бактериальной культуры [14, 27, 29–32], включая фазы задержки, ускорения темпов удельного роста, стабилизации темпов роста, замедления роста, нулевого роста и распада (отрицательного роста). Следовательно, в числе независимых параметров в модели должны выступать такие факторы, как температура, кислотность, соотношение фазовых компонентов среды.

Формирование математической модели процесса и ее аналитическое решение

Как следует из представленного выше анализа, не существует единой универсальной модели генерации биогаза путем сбраживания органических отходов различного исходного состава в разных условиях процесса сбраживания и в биореакторах различной конструкции. В каждом конкретном случае выбор модели осуществляется в соответствии с параметрами исходного субстрата, термодинамическими характеристиками процесса сбраживания и др. В большинстве случаев кинетику процесса описывают по одному «лимитирующему» веществу из состава субстрата, полагая, что влиянием прочих можно пренебречь. При этом зависимость от штамма и вида микроорганизмов, а также вида субстрата концентрации лимитирующего вещества в субстрате C_s связь скорости роста бактерий μ может иметь самый различный характер.

В достаточно простой постановке химико-биотехнологического процесса математические модели сбраживания биомассы приведены в ряде

работа [26, 27, 33, 34], но для их использования на практике требуется наличие информации для конкретизации физико-химико-биологических параметров. Представленные в открытых источниках численные значения этих параметров могут различаться на порядок даже для одного и того же состава субстрата. Тем не менее численные исследования ряда авторов [9, 14, 26, 27] показывают достаточно точные результаты для описания основных закономерностей процесса анаэробного сбраживания самых распространенных видов биомассы.

За исходную нами была принята математическая модель технологического процесса производства биогаза из растительного сырья на основе системы нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка [17]:

$$\begin{aligned}\frac{dC_x}{dt} &= D(C_{x0} - C_x) + \mu C_x + K_d C_x; \\ \frac{dC_s}{dt} &= D(C_{s0} - C_s) + \mu C_x; \\ \frac{dP}{dt} &= \gamma \mu C_x.\end{aligned}\tag{1}$$

Величина удельной скорости роста μ , которая не может быть бесконечной из-за ограниченной доступности питательных веществ (концентрация субстрата C_s), зависит и от других условий окружающей среды, таких как наличие ингибиторов процесса (концентрация ингибитора I), значение pH , температура T :

$$\mu = \mu(C_x, I, pH, T).$$

Система дифференциальных уравнений для технологического процесса производства биогаза с учетом зависимости удельной скорости роста микроорганизмов от концентрации субстрата, подчиняющейся химической кинетике (модель Кобозева) [20, 22, 24], в свою очередь, имеет вид:

$$\begin{aligned}\frac{dC_x}{dt} &= K_s C_s C_x + D C_x; \\ \frac{dC_s}{dt} &= D(C_{s0} - C_s) - \alpha K_s C_s C_x; \\ \frac{dP}{dt} &= \gamma K_s C_s C_x; \\ \mu &= K_s C_s.\end{aligned}\tag{2}$$

Начальные условия для биореактора проточного типа:

$$C_x(0) = C_x^0; C_s(0) = C_s^0; P(0) = 0.\tag{3}$$

Очевидно, что уравнения (2) с начальными условиями (3) образуют задачу Коши, которая удовлетворяет теореме Пеано о разрешимости задачи Коши для ОДУ.

Запишем выражения для концентрации бактерий и концентрации питательного вещества в виде:

$$\begin{aligned} C_x(t) &= C_x^0(t) e^{-Dt}; \\ C_s(t) &= C_s^0(t) e^{-Dt}. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставив (4) в (2), получим:

$$\begin{aligned} \frac{dC_x^0}{dt} &= K_s C_x^0 C_s^0 e^{-Dt}; \\ \frac{dC_s^0}{dt} &= DC_s^0 e^{-Dt} - \alpha K_s C_x^0 C_s^0 e^{-Dt}. \end{aligned} \quad (5)$$

Подставляя выражение для $\frac{dC_x^0}{dt}$, полученное из первого уравнения, в уравнение для C_s^0 , соответственно имеем

$$\frac{dC_s^0}{dt} - \alpha \frac{dC_x^0}{dt} = DC_s^0 e^{-Dt}. \quad (6)$$

После однократного интегрирования (6) можно записать

$$C_s^0 - \alpha C_x^0 = C_s^0 e^{-Dt} + C_1. \quad (7)$$

Далее, используя выражения (4) и начальные условия (3), получим

$$C_1 = \alpha C_x^0. \quad (7a)$$

Подставляя выражение для $C_s^0(t)$, полученное из первого уравнения (5), в уравнение для C_x^0 , соответственно получим

$$\frac{dC_x^0}{dt} = K_s C_s^0 C_x^0 - \alpha K_s (C_x^0)^2 e^{-Dt}. \quad (8)$$

Производя в последнем уравнении замену $C_x^0(t) = \frac{1}{U(t)}$, приводим его к виду [35]

$$\frac{dU}{dt} + K_s C_s^0 U = \alpha K_s e^{-Dt}. \quad (9)$$

Записав выражение для $U(t)$ в виде

$$U(t) = f(t)e^{-K_s C_s^0 t} \quad (10)$$

и подставив его в (9), получим

$$\frac{df}{dt} = \alpha K_s e^{(K_s C_s^0 - D)t}. \quad (11)$$

Далее, после однократного интегрирования (11), получим

$$f(t) = \frac{\alpha K_s}{(K_s C_s^0 - D)} e^{(K_s C_s^0 - D)t} + C. \quad (12)$$

Используя выражения (4), (6), (10) и (11) получим:

$$U(t) = \frac{\alpha K_s}{K_s C_s^0 - D} e^{-Dt} + C e^{K_s C_s^0 t}; \quad (13)$$

$$C_x(t) = \frac{1}{\frac{\alpha K_s}{K_s C_s^0 - D} + C e^{(D - K_s C_s^0)t}}. \quad (14)$$

Применяя к (14) начальные условия (3), получим выражение для произвольной константы C

$$C = \frac{1}{C_x^0} - \frac{\alpha K_s}{K_s C_s^0 - D}. \quad (15)$$

Используя выражения (3), (7), (14) и (15), окончательно получим решение системы уравнений (2) в виде:

$$C_x(t) = \frac{1}{\frac{\alpha K_s}{K_s C_s^0 - D} + \left(\frac{1}{C_x^0} - \frac{\alpha K_s}{K_s C_s^0 - D} \right) e^{(D - K_s C_s^0)t}}; \quad (16)$$

$$C_s(t) = C_s^0 + \alpha C_x^0(t) e^{-Dt} - \frac{\alpha}{\frac{\alpha K_s}{K_s C_s^0 - D} + \left(\frac{1}{C_x^0} - \frac{\alpha K_s}{K_s C_s^0 - D} \right) e^{(D - K_s C_s^0)t}}.$$

На рис. 1–3 представлены графики динамики концентрации бактерий, концентрации питательного вещества и скорости производства биогаза в биореакторе проточного типа для трех значений скорости ($D = 0,10$; $0,42$; $0,60$) подачи питательных веществ в биореактор. Характер кривых динамики концентрации бактерий (рис. 1) в биореакторе проточного типа показывает, что при низких значениях скорости подачи питательных веществ в биореактор концентрация бактерий не достигает стационарных значений даже спустя тридцать дней от начала процесса. Это свидетель-

ствует о необходимости расчета оптимальных значений скорости подачи питательных веществ. Из анализа вида кривых для динамики концентрации питательного вещества (рис. 2) следует, что исследуемая математическая модель достаточно хорошо согласуется с эмпирическими зависимостями для описания непрерывного режима подачи субстрата. При этом надо отметить, что решения (16) имеют физический смысл только если $D \leq K_s C_{s0}$. В стационарном режиме работы проточного биогазового реактора при $t \rightarrow \infty$ формулы (16) принимают вид:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} C_x(t) = \frac{K_s C_s^0 - D}{\alpha K_s};$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} C_s(t) = \frac{D}{K_s}.$$
(17)

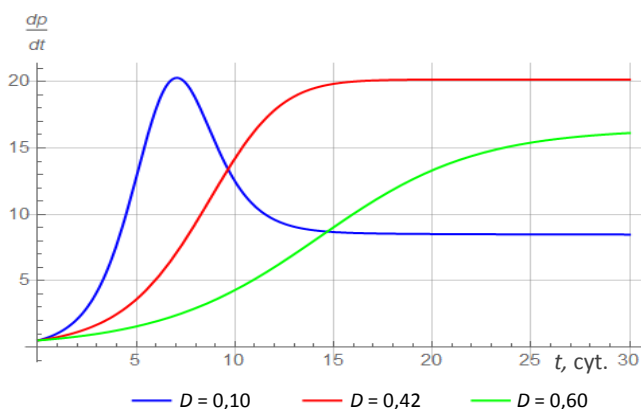


Рис. 1. Динамика концентрации бактерий в биореакторе проточного типа в зависимости от скорости подачи питательных веществ

Fig. 1. Dynamics of bacterial concentration in a flow-type bioreactor depending on the rate of nutrient supply

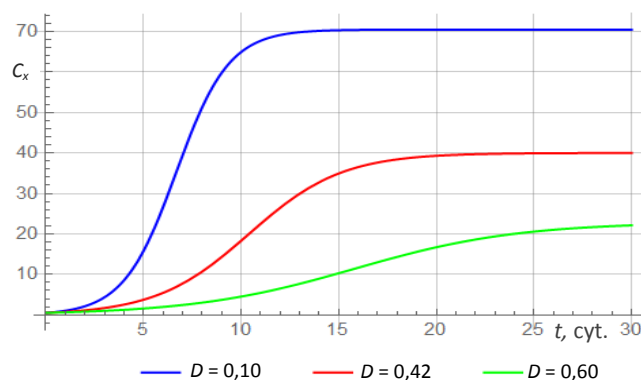


Рис. 2. Динамика концентрации питательного вещества, усвояемого бактериями в биореакторе проточного типа, в зависимости от скорости подачи питательных веществ

Fig. 2. Dynamics of nutrient concentration absorbed by bacteria in a flow-type bioreactor depending on the rate of nutrient supply

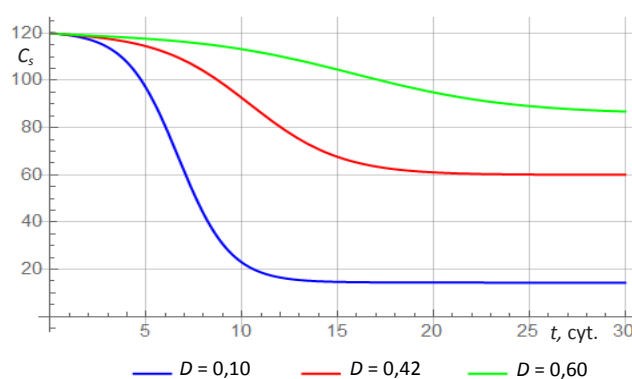


Рис. 3. Динамика скорости производства биогаза в биореакторе проточного типа в зависимости от скорости подачи питательных веществ

Fig. 3. Dynamics of biogas production rate in a flow-type bioreactor depending on the rate of nutrient supply

Профили кривых для динамики скорости производства биогаза (рис. 3) показывают, что при низких значениях скорости подачи питательных веществ в биореактор скорость производства биогаза имеет характерный максимум с последующим спадом, обусловленным недостаточным питанием бактерий, популяция которых чрезмерно размножилась за счет значительного начального количества питательных веществ. Величина скорости выхода биогаза в стационарном режиме работы проточного биогазового реактора

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dP}{dt} = \frac{\gamma D (K_s C_s^0 - D)}{\alpha K_s}. \quad (18)$$

Для того чтобы найти оптимальный режим подачи питательных веществ в биореактор, приравняем к нулю первую производную от величины скорости выхода биогаза по параметру D

$$\frac{d^2 P}{dt dD} = \frac{\gamma D (K_s C_s^0 - 2D)}{\alpha K_s} = 0. \quad (19)$$

Из (19) следует, что для $\frac{d^2 P}{dt dD} = 0$ скорость подачи питательных веществ в биореактор должна определяться выражением $D = \frac{1}{2} K_s C_s^0$. В этом случае максимальная величина скорости выхода биогаза в стационарном режиме работы проточного биогазового реактора будет определяться выражением

$$G_{\max} = \frac{\gamma K_s (C_s^0)^2}{4\alpha}.$$

На рис. 4 представлена зависимость скорости производства биогаза в биореакторе проточного типа от скорости подачи питательных веществ. Как и предполагалось, максимум производства биогаза наблюдается в области оптимальной скорости подачи питательных веществ в биореактор.

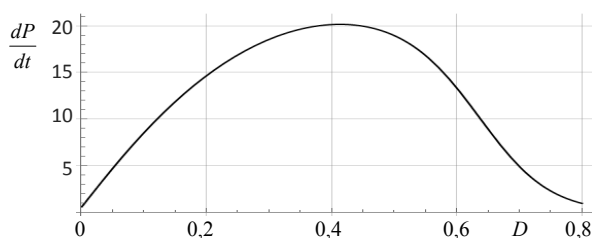


Рис. 4. Зависимость скорости производства биогаза в биореакторе проточного типа от скорости подачи питательных веществ

Fig. 4. The dependence of the biogas production rate in a flow-type bioreactor on the rate of nutrient supply

ВЫВОДЫ

1. Одним из наиболее перспективных направлений развития биоэнергетики является разработка научно-технологических основ создания многосырьевой гибридной энерготехнологической системы генерации и обогащения биогаза проточно-накопительного типа, состоящей из нескольких корпусов гидравлически последовательно связанных колонн непрерывного действия, в которой необходимо свести к минимуму температурную неоднородность и организовать рациональный отвод ингибирующих продуктов жизнедеятельности бактерий в биореакторе. Для обеспечения оптимального температурного режима в биореакторе необходимо использовать теплоту региональных альтернативных источников энергии, включая энергию побочных энергетических потоков, таких как энергия теплоносителя в системах охлаждения солнечных фотоэлементов, низкотемпературный потенциал конденсации водяных паров, выхлопных газов энергетических систем, использующих биогаз в качестве топлива и т. п.

2. В ходе исследований использованы математическая модель технологического процесса и ее аналитическое решение. Полученные результаты показали, что исследованная математическая модель достаточно хорошо согласуется с эмпирическими зависимостями для описания непрерывного режима подачи субстрата в проточный биореактор и находится в хорошем согласии с результатами численных расчетов, представленными в открытом информационном пространстве [26, 27, 35]. Выявлена характерная зависимость темпов производства биогаза от скорости подачи питательных веществ в биореактор.

3. Полученные решения в дальнейшем планируется применять в системе управления разрабатываемой многосырьевой гибридной энерготех-

нологической системой для генерации и обогащения биогаза проточно-накопительного типа с использованием альтернативных источников энергии.

Обозначения:

$C_x(t)$ – концентрация бактерий, кг/м³;
 $C_s(t)$ – концентрация питательного вещества, усвояемого бактериями, кг/м³;
 P – выход биогаза, м³;
 D – скорость подачи питательных веществ в биореактор, сут.⁻¹;
 K_s – коэффициент скорости роста бактерий, м³/(кг·сут.);
 α – безразмерный коэффициент освоения бактериями питательного вещества;
 γ – коэффициент превращения питательного вещества в биогаз, м³/кг.

Legend:

$C_x(t)$ – bacteria concentration, kg/m³;
 $C_s(t)$ – concentration of nutrient absorbed by bacteria, kg/m³;
 P – biogas yield, m³;
 D – rate of nutrient addition to the bioreactor, day⁻¹;
 K_s – bacterial growth rate coefficient, m³/(kg·day);
 α – dimensionless coefficient of nutrient absorption by bacteria;
 γ – coefficient of nutrient conversion into biogas, m³/kg.

ЛИТЕРАТУРА

1. Седнин, В. А. Современное состояние и основные тенденции развития систем генерации биогаза / В. А. Седнин, П. П. Храмцов // *Энергоэффективность*. 2024. № 8. С. 8–13.
2. Зеленуха, Е. В. Обоснование использования биогаза для производства энергии в Республике Беларусь / Е. В. Зеленуха [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 6. С. 530–543. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-530-543>.
3. Global bioenergy statistics 2022 // World Bioenergy Association. URL: <https://www.worldbioenergy.org/uploads/221223%20WBA%20GBS%202022.pdf>.
4. Biofuels and their sources of production: A review on cleaner sustainable alternative against conventional fuel, in the framework of the food and energy nexus / S. Mahapatra, D. Kumar, B. Singh, P. K. Sachan // *Energy Nexus*. 2021. Vol. 4. Art. 100036. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.100036>.
5. European Biogas Association: [website]. Available at: <http://european-biogas.eu>.
6. Emerging technologies for biofuel production: A critical review on recent progress, challenges and perspectives / T. G. Ambaye, M. Vaccari, A. Bonilla-Petriciolet [et al.] // *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 290. Art. 112627. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112627>.
7. Щукина, Т. В. Биогаз – перспективы и возможности производства / Т. В. Щукина // *Изв. вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2012. № 1(2). С. 113–118.
8. Ковалев, А. А. Технологии и технико-энергетическое обоснование производства биогаза в системах утилизации навоза животноводческих ферм: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.14.08. / А. А. Ковалев; Всерос. НИИ электрификации сел. хоз-ва. М., 1998. 36 с.
9. Компьютерное моделирование биотехнологических процессов и систем: учеб. пособие / Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий, Е. И. Муратова, А. А. Ермаков. Тамбов: Тамбовский гос. техн. ун-т (ТГТУ), 2005. 80 с.
10. Исаков, В. Г. Энергетическая эффективность малого биореактора в различных климатических зонах / В. Г. Исаков, А. А. Абрамова, М. Ю. Дягелев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, No 4. С. 355–364. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-355-364>.

11. Кафаров, В. В. Математическое моделирование основных процессов химических производств: учеб. пособие для вузов / В. В. Кафаров, М. Б. Глебов. М.: Высш. школа, 1991. 400 с.
12. Mandy, G. An Analysis of Available Mathematical Models for Anaerobic Digestion of Organic Substances for Production of Biogas / G. Mandy, R. Span // International Gas Union IGRC 2008. Paris, 2008. URL: https://www.researchgate.net/profile/Mandy-Gerber/publication/283518957_An_analysis_of_available_mathematical_models_for_anaerobic_digestion_of_organic_substances_for_production_of_biogas/links/53d0be4d0cf2fd75bc5d3e8f/An-analysis-of-available-mathematical-models-for-anaerobic-digestion-of-organic-substances-for-production-of-biogas.pdf.
13. Bastin, G. On-line Estimation and Adaptive Control of Bioreactors / G. Bastin, D. Dochain. Oxford – New Yourk – Tokyo: Elsevier, 1990. 377 p.
14. Review of Mathematical Models / B. Velázquez-Martí, O. W. Meneses-Quelal, J. Gaibor-Chavez, Z. Niño-Ruiz // Anaerobic Digestion Process / ed. J. R. Banu. Intechopen, 2018. P. 80815. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80815>.
15. Математическое моделирование процесса получения биогаза при переработке органических отходов / Л. А. Кушеев, Д. Ю. Суслов, А. И. Алифанова, Н. Ю. Никулин // Экология и промышленность. 2011. № 3 (28). С. 81–84.
16. Ружинская, Л. И. Математическое моделирование процессов анаэробного сбраживания органического субстрата: обзор / Л. И. Ружинская, А. А. Фоменкова // Scientific Journal "ScienceRise". 2014. № 4/2 (4). С. 63–69.
17. Методы анализа нелинейных динамических моделей / М. Холодниок, А. Клич, М. Кубичек, М. Марек; пер. с чеш. И. Е. Зино. М.: Мир, 1991. 368 с.
18. Баадер, В. Биогаз: теория и практика: пер. с нем. / В. Баадер, Е. Доне, М. Бренндерфер. М.: Колос, 1982. 148 с.
19. A High Efficient Heat Exchanger with Twisted Geometries for Biogas Process with Manure Slurry / J. Chen, M. Risberg, L. Westerlund // Applied Energy. 2020. Vol. 279. Art. 115871. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115871>.
20. Simulation and Experimental Performance of a Solar-Heated Anaerobic Digester / P. Axaopoulos, P. Panagakis, A. Tsavdaris, D. Georgakakis // Solar Energy. 2001. Vol. 70. P. 155–164. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00130-4](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00130-4).
21. Application of Solar Assisted Bioreactor for Biogas Production From Palm Oil Mill Effluent Co-digested with Cattle Manure / Z. B. Khalid, Md. N. I. Siddique, M. Nasrullah [et al.] // Environmental Technology & Innovation. 2019, Vol. 16. P. 332–343. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100446>.
22. Величко, В. В. Повышение эффективности биогазовых технологий / В. В. Величко, С. П. Кундас, Н. Ф. Капустин // Энергоэффективность. 2017. № 7. С. 10–12.
23. Athinas, S. Rambling Facets of Manure – Based Biogas Production in Europe: A Briefing / S. Athinas, G. J. Willem Eurerink // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 119. Art. 109566. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109566>.
24. Gerardi, M. H. The Microbiology of Anaerobic Digesters / M. H. Gerardi. New Jersey: John Wiley&Sons, Inc. 2003. 188 pp. <https://doi.org/10.1002/0471468967>.
25. Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction / eds. D. Deublein, A. Steinhauser. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2008. 443 pp. <https://doi.org/10.1002/9783527621705>.
26. Королев, С. А. Идентификация математической модели и исследование различных режимов метаногенеза в мезофильной среде / С. А. Королев, Д. В. Майков // Компьютерные исследования и моделирование. 2012. Т. 4, вып. 1. С. 131–141.
27. Королев, С. А. Исследование стационарных решений и оптимизация параметров математической модели метаногенеза / С. А. Королев, Д. В. Майков, И. Г. Русяк // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2012. № 3. С. 15–21.
28. Шимова, Ю. С. Моделирование биотехнологических процессов: учеб. пособие / Ю. С. Шимова. Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2018. 96 с.
29. Бирюков, В. В. Основы промышленной биотехнологии / В. В. Бирюков. М.: Колос, 2004. 296 с.

30. Смирязев, А. В. Моделирование в биологии и сельском хозяйстве: учеб. пособие. 3-е изд., испр. / А. В. Смирязев, А. В. Исачкин, Л. К. Панкина. М.: Из-во РГАУ-МСХА, 2015. 153 с.
31. Angelidaki, I. A Comprehensive Model of Anaerobic Bioconversion of Complex Substrates to Biogas / I. Angelidaki, L. Ellegaard, B. K. Ahring // *Biotechnology and bioengineering*. 1999. Vol. 63, No 3. P. 363–372. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-0290\(19990505\)63:3<363::aid-bit13>3.0.co;2-z](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-0290(19990505)63:3<363::aid-bit13>3.0.co;2-z).
32. Campbell, G. S. An Introduction to Environmental Biophysics / G. S. Campbell, J. M. Norman. New York: Springer-Verlag, 1998. 286 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1626-1>.
33. Паников, Н. С. Кинетика роста микроорганизмов / Н. С. Паников. М.: Наука. 1991. 310 с.
34. Вавилин, В. А. Моделирование деструкции органического вещества сообществом микроорганизмов / В. А. Вавилин, В. Б. Васильев, С. В. Рытов. М.: Наука, 1993. 204 с.
35. Камке, Э. Справочник по дифференциальным уравнениям в частных производных первого порядка / Э. Камке. М.: Наука, 1966. 260 с.

Поступила 10.11.2022 Подписана в печать 11.01.2023 Опубликована онлайн 30.05.2025

REFERENCES

1. Sednin V. A., Khrantsov P. P. (2024) The Current State and Main Trends in the Development of Biogas Generation Systems. *Energoeffektivnost'* [Energy efficiency], (8), 8–13 (in Russian).
2. Zelianukha A. V., Tsyhanava H. A., Belskaya H. V., Khrypovich H. A. (2024) Justification of the Use of Biogas for Power Generation in the Republic of Belarus. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (6), 530–543. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-530-543> (in Russian).
3. Global Bioenergy Statistics 2022. *World Bioenergy Association*. Available at: <https://www.worldbioenergy.org/uploads/221223%20WBA%20GBS%202022.pdf>.
4. Mahapatra S., Kumar D., Singh B., Sachan P. K. (2021) Biofuels and Their Sources of Production: A Review on Cleaner Sustainable Alternative Against Conventional Fuel, in the Framework of the Food and Energy Nexus. *Energy Nexus*, 4, 100036. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.100036>.
5. European Biogas Association. Available at: <http://european-biogas.eu>.
6. Ambaye T. G., Vaccari M., Bonilla-Petriciolet A., Prasad S., van Hullebusch E. D., Rtimi S. (2021) Emerging Technologies for Biofuel Production: A Critical Review on Recent Progress, Challenges and Perspectives. *Journal of Environmental Management*, 290, 112627. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112627>.
7. Shchukina T. V. (2012) Biogas: prospects and production opportunities. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, (1), 113–118 (in Russian).
8. Kovalev A. A. (1998) *Technologies and Feasibility Study of Biogas Production in Manure Recycling Systems of Livestock Farms* [Dissertation]. Moscow, All-Russian. Research Institute of Rural Electrification. 36 (in Russian).
9. Dvoretiskii D. S., Dvoretiskii S. I., Muratova E. I., Ermakov A. A. (2005) *Computer Simulation of Biotechnological Processes and Systems*. Tambov, Tambov State Technical University (TSTU). 80 (in Russian).
10. Isakov V. G., Abramova A. A., Dyagelev M. Yu. (2020) Energy Efficiency of a Small Bioreactor in Various Climatic Zones. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (4), 355–364. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-355-364> (in Russian).
11. Kafarov V. V., Glebov M. B. (1991) *Mathematical Simulation of the Main Processes of Chemical Production*. Moscow, Vysshaya shkola Publ. 400 (in Russian).
12. Geber M., Span R. (2008) An Analysis of Available Mathematical Models for Anaerobic Digestion of Organic Substances for Production of Biogas. *International Gas Union IGRC 2008*. Paris. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Mandy-Gerber/publication/283518957_An_analysis_of_available_mathematical_models_for_anaerobic_digestion_of_organic_substances_for_production_of_biogas/links/53d0be4d0cf2fd75bc5d3e8f/An-analysis-of-available-mathematical-models-for-anaerobic-digestion-of-organic-substances-for-production-of-biogas.pdf.
13. Bastin G., Dochain D. (1990) *On-line Estimation and Adaptive Control of Bioreactors*. Amsterdam – Oxford – New Yourk – Tokyo, Elsevier. 377.

14. Velázquez-Martí B., Meneses-Quelal, O. W., Gaibor-Chavez J., Niño-Ruiz Z. (2019) Review of Mathematical Models for the Anaerobic Digestion Process. Banu J. R. (ed.). *Anaerobic Digestion*. Intechopen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.73348>.
15. Kushcheev L. A., Suslov D. Y., Alifanova A. I., Nikulin N. Yu. (2011) Mathematical Simulation of the Biogas Production Process during the Processing of Organic Waste. *Ekologiya i Promyshlennost'* [Ecology and Industry], (3), 81–84 (in Russian).
16. Ruzhinskaya L. I., Fomenkova A. A. (2014) Mathematical Simulation of the Processes of Anaerobic Digestion of an Organic Substrate. Review. *ScienceRise*, (4/2), 63–69 (in Russian).
17. Kholodniok M., Klich A., Kubichek M., Marek M. (1991) Methods of Analysis of Nonlinear Dynamic Models. Moscow, Mir Publ. 368 (in Russian).
18. Baader W., Dohne E., Brenndörfer M. (1978) *Biogas in Theorie und Praxis: Behandlung Organischer Reststoffe aus der Landwirtschaft durch Methangärung*. Münster: Darmstadt-Kranichstein Verlag. 134.
19. Chen J., Risberg M., Westerlund L., Jansson U., Lu X., Wang C., Ji X. (2020) A High Efficient Heat Exchanger with Twisted Geometries for Biogas Process with Manure Slurry. *Applied Energy*, 279, 115871. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115871>
20. Axaopoulos P., Panagakos P., Tsavdaris A., Georgakakis D. (2001). Simulation and Experimental Performance of a Solar-Heated Anaerobic Digester. *Solar Energy*, 70 (2), 155–164 [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00130-4](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00130-4).
21. Khalid Z. B., Siddique M. N. I., Nasrullah M., Singh L., Wahid Z. B. A., Ahmad M. F. (2019). Application of Solar Assisted Bioreactor for Biogas Production from Palm Oil Mill Effluent Co-digested with Cattle Manure. *Environmental Technology & Innovation*, 16, 100446. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100446>.
22. Velichko V. V., Kundas S. P., Kapustin N. F. (2017) Improving the Efficiency of Biogas Technologies. *Energoeffektivnost'* [Energy efficiency], (7), 10–12 (in Russian).
23. Achinas S., Willem Euvierink G. J. (2020) Rambling Facets of Manure-based Biogas Production in Europe: A Briefing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109566. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109566>.
24. Gerardi M. H. (2003) *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. Hoboken, John Wiley&Sons, Inc. 177. <https://doi.org/10.1002/0471468967>.
25. Deublein D., Steinhauser A. (eds.) (2008) *Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction*. Weinheim, WILEY-VCH Verlag, 443. <https://doi.org/10.1002/9783527621705>.
26. Korolev S. A., Maykov D. V. (2012) Identification of a Mathematical Model and Research of the Various Modes of Methanogenesis in Mesophilic Environments. *Computer Research and Modeling*, 4 (1), 131–141 (in Russian).
27. Korolev S. A., Maikov D. V., Rusyak I. G. (2012) The Research of Stationary Solutions and the Optimization of Parameters of the Mathematical Model of Methanogenesis. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, (3), 15–21 (in Russian).
28. Shimova Yu. S. (2018) *Modeling of Biotechnological Processes*. Krasnoyarsk, SibSAU named after M. F. Reshetnev. 96 (in Russian).
29. Biryukov V. V. (2004) *Fundamentals of Industrial Biotechnology*. Moscow, Kolos Publ. 296 (in Russian).
30. Smiryaev A. V., Isachkin A. V., Pankina L. K. (2015) *Modeling in Biology and Agriculture*. 3rd Ed. Moscow, RSAU-MTAA Publ. 153 (in Russian).
31. Angelidaki I., Ellegaard L., Ahring B. K. (1999) A Comprehensive Model of Anaerobic Bioconversion of Complex Substrates to Biogas. *Biotechnology and Bioengineering*, 63 (3), 363–372. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-0290\(19990505\)63:3<363::aid-bit13>3.0.co;2-z](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-0290(19990505)63:3<363::aid-bit13>3.0.co;2-z).
32. Campbell G. S., Norman J. M. (1998) *An Introduction to Environmental Biophysics*. New York, Springer-Verlag Inc. 286. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1626-1>.
33. Panikov N. S. (1991) *Kinetics of Microbial Growth: General Patterns and Ecological Applications*. Moscow, Nauka Publ. 309 (in Russian).
34. Vavilin V. A., Vasiliev V. B., Rytov S. V. (1993) *Modeling the Destruction of Organic Matter by a Community of Microorganisms*. Moscow, Nauka Publ. 202 (in Russian).
35. Kamke E. (1966) *Handbook of Partial Differential Equations of the First Order*. Moscow: Nauka Publ. 260 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-274-286>

УДК 338.27

Методический подход к оценке затрат на увеличение электропотребления в Республике Беларусь в условиях развития атомной энергетики

Т. Г. Зорина¹⁾, С. А. Александрович²⁾, В. Ю. Кондрусев³⁾, К. В. Старостенко³⁾

¹⁾Белорусский государственный экономический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Институт энергетики НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь),

³⁾Научно-исследовательский экономический институт Министерства экономики
(Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Цель данного исследования – оценка затрат на увеличение электропотребления в Республике Беларусь на долгосрочную перспективу в условиях развития атомной энергетики. Исходные данные по различным мероприятиям в промышленном секторе (производительность, капитальные затраты, увеличение электропотребления) подготовлены на основе анализа планируемых к реализации инвестиционных проектов в Республики Беларусь и зарубежных странах (преимущественно Российской Федерации). Для достижения поставленной цели была построена оптимизационная модель. Критерием оптимизации является минимизация капитальных затрат на реализацию мероприятий по увеличению электропотребления с достижением технически возможного его потенциала. Ограничениями являлись технически возможный потенциал увеличения электропотребления, а также объемы выпускаемой продукции. На основе оптимизационной модели с учетом вариации входных параметров разработаны сценарии, предусматривающие нарастающее увеличение объема производимой той или иной продукции с целью минимизации суммарных затрат на реализацию комплекса мероприятий. Результаты моделирования показали, что для повышения электропотребления по ряду видов экономической деятельности в промышленном секторе производство отдельной категории продукции необходимо существенно увеличить. Это может, с одной стороны, выступить инструментом импортозамещения (т. е. отказа от импортных поставок данной категории продукции) и, с другой стороны, повысить экспортный потенциал промышленных производителей Республики Беларусь.

Ключевые слова: увеличение электропотребления, топливно-энергетические ресурсы, технический потенциал, виды экономической деятельности, оценка затрат, оптимизационная модель, сценарное моделирование, долгосрочное прогнозирование, капитальные затраты, комплекс мероприятий, промышленное производство, объемы выпускаемой продукции, усредненный тариф, атомная энергетика

Для цитирования: Методический подход к оценке затрат на увеличение электропотребления в Республике Беларусь в условиях развития атомной энергетики / Т. Г. Зорина [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 3. С. 274–286. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-274-286>

Адрес для переписки

Зорина Татьяна Геннадьевна
Белорусский государственный
экономический университет
пр. Партизанский, 26,
220070, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: 375 29 667-85-07
tanyazorina@ipe.by

Address for correspondence

Zoryna Tatsiana G.
Belarusian State
University of Economics
Partizansky Prospect, 26,
220070, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 667-85-07
tanyazorina@ipe.by

Methodical Approach to Estimating the Costs of Increasing Electricity Consumption in the Republic of Belarus in the Context of Nuclear Energy Development

T. G. Zoryna¹⁾, S. A. Aliksandrovich²⁾, V. Yu. Kondrusev³⁾, K. V. Starostenko³⁾

¹⁾Belarusian State University of Economics (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

³⁾The Economy Research Institute of the Ministry of Economy (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The purpose of this study is to estimate the costs of increasing electricity consumption in the Republic of Belarus for the long term in the context of the development of nuclear energy. The initial data on various activities in the industrial sector (productivity, capital expenditures, increase in electricity consumption) were prepared based on the analysis of investment projects planned for implementation in the Republic of Belarus and foreign countries (mainly the Russian Federation). To achieve this goal, an optimization model was built. The optimization criterion is the minimization of capital expenditures for the implementation of measures to increase electricity consumption while achieving its technically possible potential. The limitations were the technically possible potential for increasing electricity consumption, as well as the volume of output. Based on the optimization model, taking into account variations in input parameters, scenarios have been developed that provide for an escalating increase in the volume of products produced in order to minimize the total costs of implementing a set of measures. The simulation results showed that in order to increase electricity consumption for a number of types of economic activities in the industrial sector, the production of a particular category of products must be significantly increased. This can, on the one hand, act as an instrument of import substitution (i.e., refusal of import supplies of this category of products) and, on the other hand, increase the export potential of industrial producers of the Republic of Belarus.

Keywords: increase in electricity consumption, fuel and energy resources, technical potential, types of economic activities, cost estimation, optimization model, scenario modeling, long-term forecasting, capital expenditures, set of measures, industrial production, output volumes, average tariff, nuclear energy

For citation: Zoryna T. G., Aliksandrovich S. A., Kondrusev V. Yu., Starostenko K. V. (2025) Methodical Approach to Estimating the Costs of Increasing Electricity Consumption in the Republic of Belarus in the Context of Nuclear Energy Development. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (3), 274–286. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-274-286> (in Russian)

Введение

Увеличение потребления электрической энергии является приоритетной задачей для эффективного функционирования национальной экономики Республики Беларусь. В мировом сообществе наиболее популярными являются исследования Международного энергетического агентства (IEA) и Международного энергетического форума (IEF), направленные на прогнозирование увеличения потребления электроэнергии с учетом роста ВВП в мире. Вопросам моделирования потребления электроэнергии промышленными предприятиями с неоднозначной взаимосвязью между электропотреблением и отчетным выпуском продукции посвящено [1]. В рамках исследований [2] внимание акцентируется на важности не только увеличения потребления электрической энергии в стране, но и сопутствующем ему снижении энергоемкости ВВП. При этом на данный момент остается нерешенной проблема максимально эффективного и экономически целесообразного функционирования национальной экономики. Автор [3] обосновывает необходимость стимулирования небытового электропотребления

путем развития перерабатывающих отраслей экономики, создания промышленных и сельскохозяйственных предприятий в регионах с низкой электровооруженностью как необходимого элемента обеспечения структурной устойчивости российской экономики. Вопросам повышения эффективности планирования как основе управления инвестиционной деятельностью промышленных предприятий посвящено [4].

В [5] впервые сфокусировано внимание на эффективном функционировании топливно-энергетического комплекса Беларуси с учетом увеличения мощностей по выработке электроэнергии. Основное внимание в рамках исследования уделено мероприятиям, связанным с обеспечением режимной совместимости АЭС с энергосистемой (в первую очередь, это обеспечение прохождения ночного минимума нагрузки и покрытия ее максимума), так как ввод БелАЭС повлечет увеличение установленной мощности генерирующих энергоисточников. Однако в исследовании [5] не рассматривались конкретные мероприятия по увеличению электропотребления. Поэтому остро стоит вопрос максимально эффективного использования дополнительного количества вырабатываемой электроэнергии в республике. В монографии [6] прогнозируется увеличение потребления электроэнергии с целью обеспечения роста ВВП, рассматривается проблема недостаточно эффективного использования потенциала полезных ископаемых в части нефтепереработки в мире.

Оценка затрат отдельных мероприятий, с точки зрения их экономической эффективности, проведена [7]. Основная идея автора заключалась в определении подхода к энергосбережению и выявлении сравнительной эффективности энергосберегающих мероприятий с целью определения их оптимального сочетания. Тем самым ученый исследовал существующие строительные проекты с привязкой к конкретным показателям, характеризующим температурную эффективность и теплоутилизационные свойства оборудования [7]. Таким образом, в его исследованиях приоритет отдавался именно техническим параметрам и показателям, а не их экономической составляющей. Исследования других авторов схожи в части экономической оценки инвестиционных проектов [8, 9]. Так, общими методами, которые выделяются в обеих работах, являются оценки: «сверху вниз», «снизу вверх», параметрическая, по аналогу. Наиболее целесообразной авторы считают оценку, которая заключается в определении капитальных затрат по проекту, затрат на оборудование, энергетических затрат и других на основе многопараметрической модели.

Наиболее комплексно и универсально оценка затрат рассмотрена в исследовании [10], где подробно рассмотрена структура затрат и факторы стоимости проекта. Тем самым расчет стоимости проекта происходит путем разложения всех издержек, которые прямо или косвенно могут быть включены в итоговую стоимость.

Таким образом, установлено (изучение мирового опыта, а также исследований белорусских ученых), что проблема реализации технически возможного потенциала Беларуси в рамках увеличения потребления электрической энергии раскрыта не в полной мере.

На сегодняшний день ключевые направления увеличения потребления электроэнергии в Республике Беларусь регламентируются такими нормативными актами, как:

– Межотраслевой комплекс мер по увеличению потребления электроэнергии до 2030 г.;

– Программа увеличения электропотребления для нужд отопления, горячего водоснабжения и пищеприготовления на 2021–2025 гг.;

– Комплексный план развития электроэнергетической сферы до 2025 г. с учетом ввода Белорусской атомной электростанции.

Стоит отметить, что основными рисками при нерациональном использовании потенциала энергетической сферы являются потеря конкурентоспособности, увеличение тарифов на отпускаемую электроэнергию, сохраняющийся дисбаланс мощностей и др. Следовательно, актуальным в настоящее время является определение наиболее приоритетных направлений с целью их дальнейшего технологического развития и использования потенциала увеличения потребления электроэнергии.

Основная часть

Все индустриально развитые страны в ходе трансформации экономики наращивают потребление электрической энергии благодаря таким ее неоспоримым преимуществам, как возможность передачи на большие расстояния и подвода к труднодоступным объектам, относительная легкость трансформации в другие виды энергии.

Для определения технически возможного потенциала увеличения электропотребления по отраслям были выделены те из отраслей, которые имеют наибольший удельный вес в потреблении ТЭР в масштабах страны и значительные перспективы роста электропотребления. Последний показатель оценивался как разница между долей потребления электроэнергии по каждому конкретному виду деятельности (или отрасли) в сравниваемых странах и в Беларуси.

Для этого изучен опыт развитых зарубежных стран в области использования различных видов топливно-энергетических ресурсов, имеющих сходные условия (климатические условия, численность населения и др.) с Республикой Беларусь. В качестве таких выбраны развитые страны Европейского союза (Германия, Франция, Финляндия, Швеция), страны ЕС – бывшие члены Совета экономической взаимопомощи (СЭВ) (Чехия, Словакия, Польша) [11].

Уровень потребления электрической энергии по ряду видов экономической деятельности в республике значительно ниже, чем в развитых европейских странах, имеющих схожие условия. При этом чем больше разница в доле электрической энергии в структуре конечного потребления ТЭР между развитыми странами (столбец 2 табл. 1) и Республикой Беларусь (столбец 3 табл. 1) по каждому виду деятельности, тем выше потенциал ее наращивания. Однако одного показателя недостаточно для однозначного выбора того или иного вида экономической деятельности как перспективного с точки зрения увеличения электропотребления. Необходим масштабный фактор, который учитывает вес каждого вида деятельности в структуре конечного потребления. Им является доля потребления ТЭР по данному виду экономической деятельности (столбец 4 табл. 1) в структуре конечного потребления энергоресурсов в стране. Чем выше процент потребления ТЭР указанным видом деятельности в структуре экономики страны, тем выше технический потенциал роста потребления электрической энергии.

Значения обоих показателей прямо пропорциональны потенциалу наращивания потребления электрической энергии, поэтому произведение этих параметров даст параметр (ранг), который позволит сравнить потенциал наращи-

вания потребления электрической энергии для каждого отдельного вида экономической деятельности. Иными словами, виды деятельности могут быть проранжированы по значимости. Значения вычисленных степеней отличия приведены в столбце 5 табл. 1.

Таблица 1

**Расчет степеней отличия для оценки возможного вклада
в увеличение электропотребления**
**Calculation of degrees of difference for assessing the possible contribution
to the increase in electricity consumption**

Вид экономической деятельности	Перспективная доля электроэнергии в структуре конечного потребления ТЭР по исследуемым странам, %	Республика Беларусь		Степень отличия
		Доля электроэнергии в структуре конечного потребления ТЭР, %	Доля потребления ТЭР по видам экономической деятельности в структуре конечного потребления ТЭР, %	
1	2	3	4	5
Конечное потребление по видам деятельности	33,45	14,61	100,00	–
Промышленность	35,92	26,59	22,79	–
Горнодобывающая промышленность	80,47	55,88	0,18	4,43
Строительство	27,57	15,53	0,83	9,99
Черная металлургия	44,41	52,15	1,92	–14,86
Нефтехимическая промышленность	53,08	33,20	5,07	100,79
Цветная металлургия	82,26	16,7	0,05	3,28
Производство неметаллических изделий	27,21	12,70	5,51	79,95
Транспортное машиностроение	66,67	35,19	0,56	17,63
Машиностроение	72,28	36,36	1,87	67,17
Пищевая промышленность	48,66	21,83	3,54	94,98
Бумажная промышленность	32,42	19,03	1,49	19,95
Деревообрабатывающая промышленность	40,48	24,50	1,28	20,45
Текстильно-кожевенная промышленность	48,54	34,75	0,61	8,41
Другие отрасли	56,74	0,00	0,10	5,67
Транспорт	5	3,26	18,63	
Местная авиация	0,00	0,00	0,08	0,00
Дорожный транспорт	1,9	0,49	15,82	22,31
Железные дороги	94,83	29,17	1,11	72,88
Трубопроводный транспорт	16,8	12,78	1,61	6,47
Местный водный транспорт	0,00	0,00	0,01	0,00
Другие сферы транспорта	13,73	0,00	0,00	0,00
Другие отрасли	52,19	18,04	44,04	
Бытовой сектор	50,41	10,66	29,07	1155,53
Торговля и услуги	60,42	45,81	8,90	130,03
Сельское хозяйство	19,24	12,57	6,06	40,42
Другие секторы	14,23	0,00	0,00	0,00

Степень отличия вычислим по формуле

$$R = S_{\text{ТЭР РБ}} \cdot (S_{\text{ЭЭ ПЕРСП}} - S_{\text{ЭЭ РБ}}),$$

где R – степень отличия; $S_{\text{ТЭР РБ}}$ – доля потребления ТЭР по видам экономической деятельности в структуре конечного потребления ТЭР в Республике Беларусь, %; $S_{\text{ЭЭ ПЕРСП}}$ – перспективная доля электроэнергии в структуре конечного потребления ТЭР по видам экономической деятельности по исследуемым странам, %; $S_{\text{ЭЭ РБ}}$ – доля электроэнергии в структуре конечного потребления ТЭР по видам экономической деятельности в Республике Беларусь, %.

Значения степеней отличия берутся с учетом знака. «Минус» означает, что уровень электрификации по указанному виду деятельности в республике выше, чем в сравниваемых странах.

Для наглядности отсортированные по рассчитанным степеням отличия виды деятельности занесены в табл. 2 в порядке убывания их значимости и проранжированы.

Таблица 2

Виды экономической деятельности, проранжированные по величине возможного увеличения электропотребления
Types of economic activities ranked by the amount of possible increase in electricity consumption

Вид экономической деятельности	Степень отличия	Ранг
Бытовой сектор	1155,53	1
Торговля и услуги	130,03	2
Нефтехимическая промышленность	100,79	3
Пищевая промышленность	94,98	4
Производство неметаллических изделий	79,95	5
Железные дороги	72,88	6
Машиностроение	67,17	7
Сельское хозяйство	40,42	8
Дорожный транспорт	22,31	9
Деревообрабатывающая промышленность	20,45	10
Бумажная промышленность	19,95	11
Транспортное машиностроение	17,63	12
Строительство	9,99	13
Текстильно-кожевенная промышленность	8,41	14
Трубопроводный транспорт	6,47	15
Горнодобывающая промышленность	4,43	16
Цветная металлургия	3,28	17
Местная авиация	0,0	18
Местный водный транспорт	0,0	19
Черная металлургия	-14,86	20

Таким образом, в структуре промышленного производства в Республике Беларусь наиболее перспективными видами экономической деятельности, с точки зрения увеличения доли электроэнергии в структуре конечного потребления энергоресурсов, являются: нефтехимическая промышленность, пищевая промышленность, производство неметаллических изделий, деревообрабатывающая промышленность, бумажная промышленность, машиностроение и транспортное машиностроение.

Расчет технически возможного потенциала увеличения потребления электроэнергии в структуре конечного потребления энергоресурсов (табл. 3) рассчитаем по формуле

$$TP_{ЭЭ РБ} = C_{ЭЭ РБ} \cdot \left(\frac{S_{ЭЭ ПЕРСП}}{S_{ЭЭ РБ}} - 1 \right),$$

где $TP_{ЭЭ РБ}$ – технически возможный потенциал увеличения электропотребления в структуре конечного потребления, млн кВт·ч; $C_{ЭЭ РБ}$ – потребление электроэнергии по видам экономической деятельности в Республике Беларусь, млн кВт·ч.

Таблица 3

Расчет технически возможного потенциала увеличения конечного потребления электроэнергии по видам деятельности [11]

Calculation of technically possible potential to increase final electricity consumption by type of activity [11]

Наименование показателя	Потребление электроэнергии в республике, тыс. т н. э.	Потребление электроэнергии в республике, млн кВт·ч	Текущая доля электроэнергии в структуре конечного потребления ТЭР, %	Перспективная доля электроэнергии в конечном потреблении, %	Прогнозное потребление электроэнергии в республике к 2050 г., млн кВт·ч	Технически возможный потенциал увеличения электропотребления в структуре конечного потребления, млн кВт·ч
Нефтехимическая промышленность	327	3803,01	33,2	53,08	6080,23	2277
Пищевая промышленность	150	1744,5	21,83	48,66	3888,56	2144
Производство неметаллических изделий	136	1581,68	12,7	27,21	3388,78	1807
Машиностроение	132	1535,16	36,36	72,28	3051,74	1517
Транспортное машиностроение	38	441,94	35,19	66,67	837,29	395
Деревообрабатывающая промышленность	55	639,65	19,03	32,42	1089,72	450
Бумажная промышленность	61	709,43	24,50	40,48	1172,15	463
Сельское хозяйство	148	1721,24	12,57	19,24	2634,58	913
Сфера услуг	792	9210,96	45,81	60,42	12148,57	2937
Суммарный прирост			12903			

Таким образом, возможное увеличение доли электрической энергии в структуре конечного потребления ТЭР по выбранным видам экономической деятельности в промышленном секторе до уровня развитых европейских стран может составить более 9 млрд кВт·ч в год. При увеличении доли электроэнергии в структуре конечного потребления энергоресурсов до уровня развитых европейских стран потенциал увеличения потребления электрической энергии в сельском хозяйстве находится на уровне 0,9 млрд кВт·ч в год, в сфере услуг – 2,9 млрд кВт·ч (табл. 3) [12].

Технически возможный потенциал увеличения электропотребления может быть достижим к 2050 г. за счет роста объемов производимой продукции (ОПП) и создания новых энергоемких производств. Сведения об изменении объемов производимой продукции по исследуемым видам экономической деятельности в 2016–2020 гг. представлены в табл. 4.

Таблица 4

Динамика объемов производимой продукции по исследуемым видам экономической деятельности в 2016–2020 гг. [13]

Dynamics of production volumes by types of economic activity in 2016–2020 [13]

Вид экономической деятельности (ОКЭД-2011)	2016 г.	2017 г.		2018 г.		2019 г.		2020 г.	
	ОПП, млн руб.	ОПП, млн руб.	Темп роста, %	ОПП, млн руб.	Темп роста, %	ОПП, млн руб.	Темп роста, %	ОПП, млн руб.	Темп роста, %
Нефтехимическая промышленность	21289,7	25227,0	118,5	30623,9	121,4	28590,7	93,4	22894,6	80,1
Пищевая промышленность	25682,9	27092,3	105,5	28010,9	103,4	28800,3	102,8	30723,8	106,7
Производство неметаллических изделий	7595,2	8363,5	110,1	8428,9	100,8	8266,7	98,1	8376,1	101,3
Машиностроение	13691,3	15845,1	115,7	18216,2	115,0	17721,5	97,3	17594,2	99,3
Транспортное машиностроение	3266,0	3193,1	97,8	3846,0	120,5	5097,1	132,5	5379,6	105,5
Деревообрабатывающая и бумажная промышленность	3913,8	4546,8	116,2	5697,6	125,3	5912,9	103,8	6274,2	106,1
Сельское хозяйство	19968,1	23175,3	116,1	24034,1	103,7	26881,9	111,9	29283,6	108,9
Сфера услуг:									
– услуги по временному проживанию	298,4	321,6	107,8	356,1	110,7	391,4	109,9	331,4	84,7
– информация и связь	2424,2	2700,3	111,4	2963,2	109,7	3272,7	110,4	3560,5	108,8

Анализ табл. 4 позволяет сделать вывод, что наиболее значимыми, с точки зрения увеличения электропотребления посредством роста объемов производимой продукции, являются деревообрабатывающая и бумажная промышленность (темп роста за 5 лет – 160,31 % при технически возможном потенциале увеличения электропотребления 913 млн кВт·ч), а также транспортное машиностроение (темп роста за 5 лет – 164,71 % при технически возможном потенциале увеличения электропотребления 395 млн кВт·ч).

Потенциал увеличения электропотребления энергетическом секторе не рассматривался в данном исследовании по причине того, что на сегодняшний день технический потенциал по установке электродвигателей в Белорусской энергосистеме исчерпан. Таким образом, прирост электропотребления посредством установки электродвигателей возможен путем использования данных технологий в реальном секторе экономики и жилом фонде.

Оценку затрат на реализацию мероприятий по увеличению электропотребления выполним посредством решения оптимизационной задачи, направленной на минимизацию капитальных затрат на реализацию мероприятий по увеличению электропотребления с достижением технически возможного потенциала увеличения электропотребления.

Целевая функция

$$Z = \sum_{i=1}^n Z_i^{уд} \times X_i \rightarrow \min,$$

где Z – капитальные затраты на реализацию мероприятий по увеличению электропотребления, млн дол. США; $Z_i^{уд}$ – удельные капитальные затраты на реализацию мероприятия по увеличению электропотребления, дол. США/ед. продукции/год; X_i – плановый объем производства.

Ограничения:

– прирост электропотребления должен быть не ниже технически возможного потенциала увеличения электропотребления

$$P_{э} = \sum_{i=1}^n P_{э,i}^{уд} \times X_i \geq \Delta P_{э},$$

где $P_{э}$ – потенциальное увеличение потребления электроэнергии от реализации мероприятий, млн кВт·ч; $P_{э,i}^{уд}$ – удельное потребление электроэнергии на производство единицы продукции, кВт·ч/ед. продукции; $\Delta P_{э}$ – технически возможный потенциал увеличения электропотребления до 2050 г., млн кВт·ч;

– ограничение по объему выпускаемой продукции

$$X_{\min} \leq X_i \leq X_{\max},$$

где $X_{\min}$ – минимальный объем выпускаемой продукции, определенный исходя из перечня потенциальных к реализации инвестиционных проектов; $X_{\max}$ – максимальный объем выпускаемой продукции (определяется оценочно).

Исходные данные по различным мероприятиям в промышленном секторе (производительность, капитальные затраты, увеличение электропотребления) подготовлены на основе анализа планируемых к реализации инвестиционных проектов в Республики Беларусь и зарубежных странах (преимущественно Российской Федерации).

Поскольку оптимизационная функция из перечня мероприятий отдает предпочтение тем, реализация которых потребует наименьших капитальных затрат, может возникнуть ситуация, когда в результате решения пред-

лагается увеличение производственных мощностей по отдельным мероприятиям до уровня, в значительной мере превышающего внутренний спрос и возможности реализации данной продукции на внешние рынки.

В связи с этим было принято решение об использовании сценарного подхода при работе с оптимизационной моделью; при этом сценарии ограничивали максимальный объем выпускаемой продукции по каждому мероприятию в соответствии с потребностями рынка.

На основании проведенных расчетов авторами было установлено, что три сценария являются необходимым и достаточным условием для принятия долгосрочных решений.

Таблица 5

Оценка затрат на реализацию мероприятий по увеличению электропотребления в промышленном секторе [14]

Estimated costs of implementing measures to increase electricity consumption in the industrial sector [14]

Наименование отрасли промышленности	Увеличение потребления электроэнергии, млн кВт·ч	Капитальные затраты, млн дол. США, в ценах 2020 г.		
		Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3
Нефтехимическая промышленность	2277	8301,5	6954,6	6266,6
Транспортное машиностроение	395	758	609,5	461
Производство неметаллических изделий	1807	3626,6	3311,9	3171,6
Деревообрабатывающая промышленность	450	794,8	625,4	577,3
Бумажная промышленность	463	1280,4	1280,4	1280,4
Пищевая промышленность	2144	5232,2	3970,2	3226,6

В табл. 5 представлены результаты оценки затрат на реализацию мероприятий по увеличению электропотребления в промышленном секторе на основе разработанных сценариев, предусматривающих различный уровень увеличения объема производимой той или иной продукции с целью минимизации суммарных затрат.

В качестве примера приведем результаты оценки затрат на реализацию мероприятий по увеличению электропотребления в деревообрабатывающей промышленности в рамках разработанных сценариев (табл. 6).

Для повышения электропотребления сельскохозяйственным организациям следует рассматривать мероприятия, связанные с расширением использования электроэнергии в современных сельскохозяйственных тепличных комплексах.

В транспортном секторе, согласно информации РУП «ПО «Белоруснефть», оценочные затраты на создание зарядной инфраструктуры для электромобильного транспорта на перспективу до 2050 г. составляют 1300 млн дол. США. Объемы и финансирование закупки городского электротранспорта производства Республики Беларусь предусматриваются в рамках Государственной программы «Транспортный комплекс» на пятилетний период.

Таблица 6

**Оценка затрат на реализацию мероприятий по увеличению электропотребления
в деревообрабатывающей промышленности [14]****Estimated costs of implementing measures to increase electricity consumption
in the woodworking industry [14]**

Мероприятие	Производительность (в год), тыс. м ³			Увеличение потребления электроэнергии, млн кВт·ч			Капитальные затраты, млн дол. США, в ценах 2020 г.		
	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3
Производство древесно-стружечных и ламинированных плит	459,3	250	250	70,3	38,3	38,3	310,5	169	169
Организация нового лесопильного и пеллетного производства	591	788	985	94,6	126,1	157,6	66,2	88,3	110,3
Увеличение объема выпуска фанеры и ГКД	600	327,3	200	120	65,5	40,0	240,3	131,1	80,1
Строительство деревообрабатывающего завода	810	1080	270	22,1	29,4	7,4	34,7	46,2	11,6
Строительство цеха по производству шпона и фанеры	540	720	773,8	135,6	180,8	194,3	137,7	183,6	197,3
Создание производства по выпуску пиломатериалов	72	96	120	7,5	10,0	12,5	5,4	7,2	9,0
ИТОГО				450	450	450	794,8	625,4	577,3

Что касается стоимости электрификации железнодорожных участков, то, по информации Белорусской железной дороги, ориентировочная стоимость электрификации 1 км железнодорожных путей составляет 1 млн дол. США. Таким образом, электрификация запланированных до 2030 г. 818 км путей составит около 818 млн дол. США.

Объемы и финансирование строительства жилых домов с использованием электроэнергии для нужд отопления, горячего водоснабжения и пищевого приготовления устанавливаются на пятилетний период в соответствии с целевыми показателями Государственной программы «Строительство жилья».

Согласно статистическим данным, фактические объемы строительства такого жилья составили: за 2021 г. – 110,597 тыс. кв. м (задание на год не доводилось), за 2022 г. – 381,051 тыс. кв. м (177 % от задания), за 2023 г. – 552,881 тыс. кв. м (251,4 % от задания), за I полугодие 2024 г. – 220,656 тыс. кв. м (55,1 % от задания на год), всего за период 2021 г. – I полугодие 2024 г. – 1 265,185 тыс. кв. м (63,3 % от задания на пятилетку).

С учетом изложенного реальные параметры ввода в эксплуатацию электродомов в 2026–2030 гг. можно оценить, как и в предшествующем периоде, в объеме порядка 2 млн кв. м, что позволит обеспечить прирост электропотребления в объеме около 300 млн кВт·ч в год.

ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ показывает, что для повышения электропотребления по ряду видов экономической деятельности производство отдельной категории продукции необходимо существенно повысить. Это может, с одной стороны, выступить инструментом импортозамещения и, с другой стороны, повысить экспортный потенциал Республики Беларусь.

2. Для оценки целесообразности наращивания экспортного потенциала необходимо наряду с оценкой емкости национального рынка оценить предполагаемые рынки сбыта и объемы поставки на них отечественной продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мороз, Д. Р. Моделирование потребления электроэнергии промышленными предприятиями с неоднозначной взаимосвязью между электропотреблением и отчетным выпуском продукции / Д. Р. Мороз, Е. Л. Шенец // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2007. № 6. С. 20–31.
2. Таболов, А. Г. Методические подходы к анализу и прогнозу энергоемкости ВВП в Республике Беларусь / А. Г. Таболов // Белорусский экономический журнал. 2011. № 3. С. 58–64.
3. Некрасов, С. А. Стимулирование электропотребления регионов-аутсайдеров – необходимое условие структурной устойчивости России / С. А. Некрасов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 2. С. 186–200. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-186-200>.
4. Повышение эффективности планирования как основа управления инвестиционной деятельностью промышленного предприятия / Е. Л. Чазов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 88–100. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-88-100>.
5. Ковалев, М. М. Будущее белорусской энергетики на фоне глобальных трендов / М. М. Ковалев, А. С. Кузнецов. Минск: Изд. центр БГУ, 2018. 223 с.
6. Заборовский, А. М. Энергетика 2030: глобальные тренды и национальная энергетическая политика / А. М. Заборовский, М. М. Ковалев, А. С. Кузнецов. Минск: Изд. центр БГУ, 2013. 150 с.
7. Самарин, О. Д. Сравнительная экономическая эффективность энергосберегающих мероприятий / О. Д. Самарин // Сантехника, Отопление, Кондиционирование (С. О. К.). 2004. № 3. URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/sravnitel-naya-ekonomicheskaya-effektivnost-energo-sberegayuschih-meropriyatiy>.
8. Матвеев, В. В. Параметрическая оценка стоимости инновационного проекта в сфере промышленного строительства / В. В. Матвеев // Инновации. 2007. № 4 (102). С. 89–91.
9. Малыгин, Н. А. Управление стоимостью инвестиционно-строительного проекта: параметрическая оценка / Н. А. Малыгин // Контентус. 2016. № 7. С. 90–96. URL: <http://kontentus.ru/wp-content/uploads/2016/07/%D0%9C%D0%B0%D0%BB%D1%8B%D0%B3%D0%B8%D0%BD-%D0%9D%D0%90..pdf> (дата обращения: 24.07.2024).
10. Курзюкова, Ф. В. Структура затрат и факторы стоимости проекта / Ф. В. Курзюкова, Г. И. Юрковская // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. 2008. № 1. С. 189–194.
11. World Energy Balances // IEA. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances> (date of access: 24.07.2024).
12. Определение технически возможного потенциала увеличения электропотребления до 2050 г. в отраслях экономики Республики Беларусь (транспорт, промышленность, жилищный сектор, сфера услуг и др.): Отчет о НИР (промежуточ.) / Институт энергетики НАН Беларуси; рук. А. А. Михалевич. Минск, 2023. 82 с. № ГР 20231119.
13. Национальный статистический комитет Республики Беларусь. Интерактивная информационно-аналитическая система распространения официальной статистической информации. URL: <https://dataportal.belstat.gov.by/osids/home-page> (date of access: 24.07.2024).
14. Оценка уровня затрат на реализацию мероприятий по увеличению электропотребления в различных отраслях экономики Республики Беларусь (транспорт, промышленность,

жилищный сектор, сфера услуг и др.): Отчет о НИР (промежуточ.) / Институт энергетики НАН Беларуси; рук. А. А. Михалевич. Минск, 2024. 45 с. № ГР 20231119.

Поступила 09.09.2024 Подписана в печать 23.01.2025 Опубликовано онлайн 30.05.2025

REFERENCES

1. Moroz D. R., Shenets E. L. (2007) Modeling of Electric Power Consumption by Industrial Enterprises with Ambiguous Interrelation between Power Consumption and Report Output. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 20–31 (in Russian).
2. Tabolov A. G. (2011) Methodological Approaches to Analysis and Projection of GDP Power Intensity in the Republic of Belarus. *Belarusian Economic Journal*, (3), 58–64 (in Russian).
3. Nekrasov S. A. (2023) Stimulating Electricity Consumption in Outsider Regions is a Necessary Condition for the Structural Stability of Russia. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (2), 186–200. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-186-200> (in Russian).
4. Chazov E. L., Grakhov V. P., Krivorotov V. V., Simchenko O. L. (2019) Improving the Efficiency of Planning. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 88–100. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-88-100> (in Russian).
5. Kovalev M. M., Kuznetsov A. S. (2018) *The Future of the Belarusian Energy Industry Against the Background of Global Trends*. Minsk, BSU Publishing Center. 223 (in Russian).
6. Zaborovsky A. M., Kovalev M. M., Kuznetsov A. S. (2013) *Energy 2030: Global Trends and National Energy Policy*. Minsk, BSU Publishing Center. 150 (in Russian).
7. Samarin O. D. (2004) Comparative Economic Efficiency of Energy-Saving Measures. *Santekhnika, Otoplenie, Konditsionirovanie (S. O. K.)* [Plumbing, Heating, Air Conditioning], (3). URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/sravnitel-naya-ekonomicheskaya-effektivnost-energibesregayuschih-meropriyatiy> (in Russian).
8. Matveev V. V. (2007) Parametric Estimation of the Cost of an Innovative Project in the Field of Industrial Construction. *Innovations*, (4), 89–91 (in Russian).
9. Malygin N. A. (2016) Management of the Cost of an Investment and Construction Project: Parametric Assessment. *Kontentus*, (7), 90–96. Available at: <http://kontentus.ru/wp-content/uploads/2016/07/%D0%9C%D0%B0%D0%BB%D1%8B%D0%B3%D0%B8%D0%BD-%D0%9D.%D0%90..pdf> (дата обращения: 24.07.2024). (in Russian).
10. Kuzukova F. V., Yurkovskaya G. I. (2008) The Structure of Project Cost and factors of Project Value. *Vestnik Sibirskogo Gosudarstvennogo Aerokosmicheskogo Universiteta imeni akademika M. F. Reshetneva Siberian Aerospace Journal*, (1), 189–194 (in Russian).
11. World Energy Balances. *IEA*. Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances> (accessed 24 July 2024).
12. Mikhalevich A. A. (head), Institute of Energy of the National Academy of Sciences of Belarus (2023) Determination of the Technically Possible Potential for Increasing Electricity Consumption by 2050 in the Sectors of the Economy of the Republic of Belarus (Transport, Industry, Housing, Services, etc.): Research Report (Interim). State Registration No. GR 20231119. Minsk, 82. (in Russian).
13. *Official Statistical Information. The Interactive Information and Analytical System for Disseminating Official Statistical Information*. URL: <https://dataportal.belstat.gov.by/osids/homepage> (accessed 24 July 2024) (in Russian).
14. Mikhalevich A. A. (head), Institute of Energy of the National Academy of Sciences of Belarus (2024) Assessment of the Cost Level for the Implementation of Measures to Increase Electricity Consumption in Various Sectors of the Economy of the Republic of Belarus (Transport, Industry, Housing, Services, etc.): Research Report (Interim). State Registration No. GR 20231119. Minsk. 45 (in Russian).

Received: 09 September 2024

Accepted: 23 January 2025

Published online: 30 May 2025