

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 68, № 2
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

- Романюк Ф. А., Румянцев Ю. В., Румянцев В. Ю., Дерюгина Е. А.** Влияние переходной характеристики цифрового фильтра на поведение микропроцессорной токовой защиты 101
- Новиков Н. Л., Нечитаев Р. А., Кашин М. А.** Потери энергии в конструктивных элементах электрооборудования при нарушении симметрии параметров режима электропередачи 111
- Высоцкий М. Э.** Определение оптимальных параметров грунтовой засыпки при прокладке силовых кабельных линий 128

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Сухоцкий А. Б., Кунтыш В. Б.** Влияние технологических факторов процесса изготовления биметаллической ребристой трубы на интенсивность теплопередачи аппаратов воздушного охлаждения 140
- Гориченко С. Ф.** Развитие методологии технического диагностирования трубопроводов газораспределительной системы и анализ эффективности способов восстановления их работоспособности 154

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

- Бирюлин М. А., Волков А. В., Дружинин А. А., Шарий В. Н., Качанов И. В., Бровка Г. М.** Оценка влияния изменения давления в проточной части на биологическую безопасность осевой гидротурбины при увеличении толщины лопасти рабочего колеса 175

Главный редактор Александр Михайлович Маляревич

Редакционная коллегия

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

Ведущий научный редактор В. Н. Гурьянчик

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

Подписано к печати 31.03.2025. Формат бумаги 60×84^{1/8}. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 11,25. Уч.-изд. л. 8,59. Тираж экз.
Дата выхода в свет . 2025. Заказ .

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

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

© Белорусский национальный технический университет, 2025

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA V. 68, No 2
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

Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Dziaruhina A. A. Influence of the Digital Filter Transient Characteristic on the Behavior of Microprocessor Current Protection	101
Novikov N. L., Nechitaev R. A., Kashin M. A. Structural Elements Energy Losses of Electrical Equipment due to a Violation of Symmetry of Power Transmission Mode Parameters	111
Vysotski M. E. Determination of Optimal Parameters of the Ground Filling During the Laying of Power Cable Lines	128

HEAT POWER ENGINEERING

Sukhotski A. B., Kuntyshev V. B. The Influence of Technological Factors of the Bi-metallic Ribbed Tube Manufacturing Process on the Heat Transfer Rate of Air-Cooling Units	140
Gorichenko S. F. Development of a Methodology for Technical Diagnostics of Pipelines of the Gas Distribution System and Analysis of the Effectiveness of Ways to Restore their Operability	154

POWER ENGINEERING ECONOMICS

Biriulin M. A., Volkov A. V., Druzhinin A. A., Shary V. N., Kachanov I. V., Brovka G. M. Assessment of the Impact of Pressure Changes in the Flow Path on the Biological Safety of an Axial Hydraulic Turbine with Increasing Thickness of the Impeller Blade	175
--	-----

Editor-in-Chief Aliaksandr M. Maliarevich

Editorial Board

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

Lead Science Editor V. N. Guryanchyk

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

Passed for printing 31.03.2025. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 11,25.
An edition of copies. Date of publishing 2025. Order list .

ADDRESS

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

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

© Belarusian National Technical University, 2025

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-101-110>

УДК 621.316.925

Влияние переходной характеристики цифрового фильтра на поведение микропроцессорной токовой защиты

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

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

Реферат. В микропроцессорной токовой защите в качестве информационных параметров тока могут использоваться мгновенные, амплитудные, действующие и средние значения. Они определяются в результате соответствующей обработки выходного сигнала цифрового фильтра. В неустановившихся режимах указанные параметры зависят от переходной характеристики фильтра. Поэтому поведение микропроцессорной токовой защиты при возникновении повреждений во многом определяется указанной характеристикой цифрового фильтра. В существующих защитах наиболее широко используются нерекурсивные фильтры Фурье и их разновидности. Главным недостатком данных фильтров является их сравнительно невысокое быстродействие. На их основе реализованы фильтры с более высокими динамическими свойствами, у которых частотные свойства сохранены. Исходя из сходства переходной характеристики, выделены следующие разновидности: фильтры с монотонной переходной характеристикой; фильтры с апериодической переходной характеристикой; фильтры с колебательной переходной характеристикой. Исследовано влияние названных фильтров на поведение микропроцессорной токовой защиты, содержащей основную быстродействующую и резервную медленнодействующую ступени. В результате выполненных исследований показано, что цифровые фильтры с монотонной переходной характеристикой обеспечивают устойчивое функционирование и селективное действие ступеней защиты при повреждениях на основном и смежном участках. Фильтры с апериодической переходной характеристикой способствуют неселективному действию быстродействующей ступени при коротких замыканиях в начале смежного участка. Фильтры с колебательной переходной характеристикой также способствуют неселективной работе быстродействующей ступени и могут обуславливать ее неустойчивое функционирование при токах короткого замыкания, близких по значениям к токам срабатывания и возврата. Медленнодействующая ступень защиты при всех видах переходных характеристик цифровых фильтров функционирует устойчиво и селективно.

Ключевые слова: микропроцессорная токовая защита, цифровые фильтры, монотонная, апериодическая и колебательная переходные характеристики, поведение ступеней защиты, неселективное действие, устойчивость функционирования

Для цитирования: Влияние переходной характеристики цифрового фильтра на поведение микропроцессорной токовой защиты / Ф. А. Романюк [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 2. С. 101–110. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-101-110>

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

Influence of the Digital Filter Transient Characteristic on the Behavior of Microprocessor Current Protection

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

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

Abstract. In microprocessor current protection, instantaneous, amplitude, current, and average values can be used as current information parameters. They are determined as a result of the appropriate processing of the digital filter output signal. In unsteady modes, the specified parameters depend on the transient characteristic of the filter. Therefore, the behavior of the microprocessor current protection in case of damage is largely determined by the specified characteristic of the digital filter. Non-recursive Fourier filters and their varieties are most widely used in existing defenses. The main disadvantage of these filters is their relatively low speed. Based on them, filters with higher dynamic properties are implemented, in which frequency properties are preserved. Based on the similarity of the transient characteristic, the following varieties are distinguished: filters with a monotonic transient characteristic; filters with an aperiodic transient characteristic; filters with an oscillatory transient characteristic. The effect of these filters on the behavior of a micro-processor current protection containing the main high-speed and backup slow-acting stages has been investigated. As a result of the mentioned investigations, it has been shown that digital filters with a monotonous transient characteristic provide stable functioning and selective action of protection steps in case of damage in the main and adjacent sections. Filters with an aperiodic transient characteristic contribute to the non-selective action of the high-speed stage in case of short circuits at the beginning of the adjacent section. Filters with an oscillatory transient characteristic also contribute to the non-selective operation of the high-speed stage and can cause its unstable operation at short-circuit currents close in values to the operating and return currents. The slow-acting protection stage functions steadily and selectively for all types of transient characteristics of digital filters.

Keywords: microprocessor current protection; digital filters; monotonic, aperiodic and oscillatory transient characteristics; behavior of protection stages; non-selective action; stability of operation

For citation: Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Dziaruhina A. A. (2025) Influence of the Digital Filter Transient Characteristic on the Behavior of Microprocessor Current Protection. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (2), 101–110. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-101-110> (in Russian)

Введение

Принцип действия микропроцессорной токовой защиты основан на сравнении контролируемого информационного параметра, характеризующего величину тока, с некоторым наперед заданным значением [1]. При превышении указанным параметром установленного значения происходит срабатывание защиты. В качестве информационных параметров тока защищаемого объекта могут использоваться его мгновенные, амплитудные, действующие и средние значения [2]. Они определяются в результате соответствующей обработки выходного сигнала цифрового фильтра (ЦФ), выделяющего из вторичного тока основную гармонику.

Функционирование ЦФ отличается инерционностью, а время установления его выходного сигнала ограничивается, как правило, длительностью одного периода основной частоты [3]. Вследствие этого переходные режимы ЦФ сопровождаются появлением в выходном сигнале динамической погрешности, изменяющейся с течением времени и полностью исчезающей при наступлении установившегося режима. Указанная погрешность сказывается на достоверности получения контролируемого информационного параметра и может создавать предпосылки для неправильного действия защиты.

Поскольку указанные выше информационные параметры, характеризующие ток, рассчитываются в результате цифровой обработки выходного сигнала ЦФ, в неустановившихся режимах они будут зависеть от переходной характеристики фильтра. По этой причине поведение микропроцессорной токовой защиты при возникновении повреждений во многом будет определяться переходной характеристикой ЦФ.

Основная часть

Рассматривая влияние ЦФ на функционирование микропроцессорной токовой защиты, будем принимать во внимание переходную характеристику фильтра при гармоническом входном воздействии. Применительно к токовой защите переходная характеристика представляет собой изменение во времени контролируемого информационного параметра, определяемого по выборкам выходного сигнала ЦФ, при внезапном коротком замыкании (КЗ) и скачке входного тока. Следует отметить, что данная переходная характеристика качественно будет повторять аналогичную характеристику собственно ЦФ.

В существующих микропроцессорных токовых защитах наиболее широко используются нерекурсивные ЦФ Фурье и их разновидности [4, 5]. Переходная характеристика указанных фильтров является монотонной, у которой первая производная $\frac{dX_{\text{вых}}(t)}{dt}$ не меняет знака, а время установления выходного сигнала t_y обычно не превышает периода основной частоты [6] (рис. 1, кривая 1).

Главным недостатком рассматриваемых ЦФ является их сравнительно невысокое быстродействие. Для повышения динамических свойств ЦФ Фурье в [7] предложено обрабатывать их выходной сигнал цифровым усилительным элементом с нелинейным коэффициентом усиления, называемым корректирующим. Практическая реализация данного предложения заключается в формировании эквивалентного выходного сигнала фильтра путем умножения сигнала на выходе ЦФ Фурье на корректирующий коэффициент [8]. Теоретические предпосылки и методика задания названного коэффициента подробно изложены в [9].

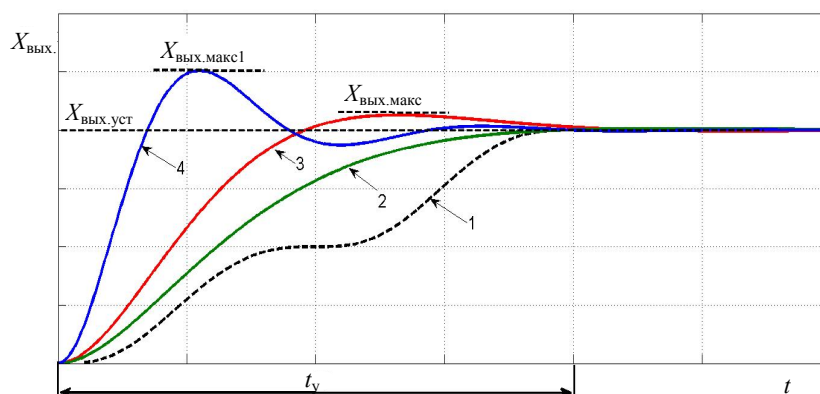


Рис. 1. Переходные характеристики цифрового фильтра

Fig. 1. Digital filters transient characteristics

В [9] представлены ЦФ, полученные на основе фильтров Фурье в результате реализации изложенных выше положений, с более высокими динамическими свойствами. Их быстродействие более чем в два раза выше, чем у ЦФ Фурье. При этом следует отметить, что частотные свойства ЦФ Фурье и разработанных фильтров на их основе являются практически одинаковыми. Положив в основу сходство вида переходной характеристики, можно выделить следующие разновидности представленных ЦФ:

- фильтры с монотонной переходной характеристикой, обладающие более высоким быстродействием по сравнению с ЦФ Фурье (рис. 1, кривая 2);
- цифровые фильтры с апериодической переходной характеристикой

(рис. 1, кривая 3), у которой первая производная $\frac{dX_{\text{вых}}(t)}{dt}$ меняет знак не более одного раза за время переходного процесса. Они имеют более высокие динамические свойства по сравнению с ЦФ, у которых переходная характеристика является монотонной. Для ЦФ этой разновидности характерно перерегулирование, оцениваемое максимальным отклонением переходной характеристики $X_{\text{вых.макс}}$ от установившегося значения выходного сигнала $X_{\text{вых.уст}}$ [10]:

$$S = \frac{X_{\text{вых.макс}} - X_{\text{вых.уст}}}{X_{\text{вых.уст}}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

- фильтры с колебательной переходной характеристикой, у которых первая производная $\frac{dX_{\text{вых}}(t)}{dt}$ меняет знак периодически (рис. 1, кривая 4), обладающие наиболее высокими динамическими свойствами. Для этих фильтров также характерно перерегулирование, которое оценивается по первому максимуму выходного сигнала $X_{\text{вых.макс1}}$. Важным параметром ЦФ

данной разновидности является колебательность, выражаемая числом полных колебаний переходной характеристики за время переходного процесса.

Следует отметить, что вид переходной характеристики и динамические свойства рассмотренных выше ЦФ главным образом зависят от реализованной аппроксимации корректирующего коэффициента. При этом указанные характеристика и свойства во многом будут определять в режиме повреждений поведение микропроцессорной токовой защиты, которое может оказаться нежелательным и даже недопустимым.

Рассмотрим поведение защиты A_1 , поочередно содержащей ЦФ с выделенными переходными характеристиками, при КЗ в различных точках сети, представленной на рис. 2.

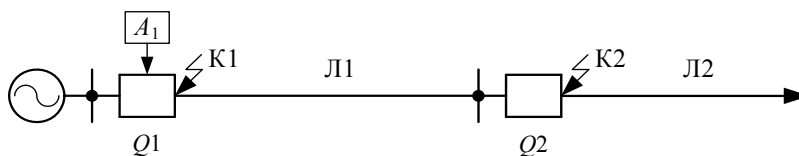


Рис. 2. Схема сети

Fig. 2. Network diagram

При этом будем полагать, что в качестве контролируемого информационного параметра используется действующее значение тока, а A_1 содержит основную быстродействующую ступень и резервную медленнодействующую ступень, осуществляющую ближнее и дальнее резервирование [11].

На рис. 3 показано взаимное расположение трех видов переходных характеристик ЦФ при максимальном входном сигнале, пропорциональном току внезапного КЗ при повреждении в точке К1.

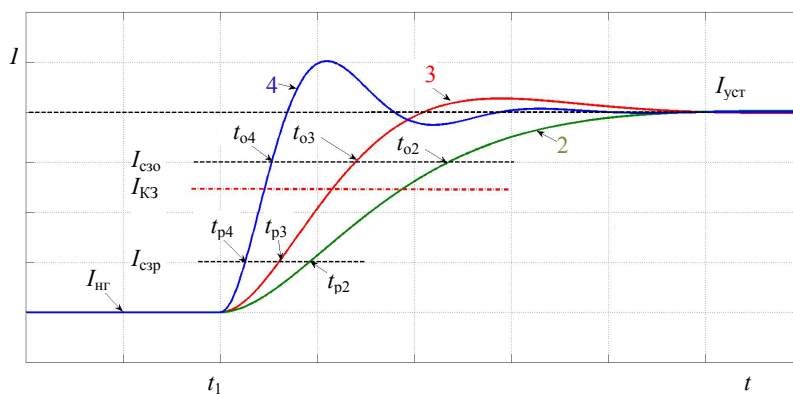


Рис. 3. К оценке поведения защиты с различными цифровыми фильтрами

Fig. 3. Towards the behavior of protection with different digital filters

В нормальном режиме до момента времени t_1 выходной сигнал ЦФ с любой переходной характеристикой пропорционален току нагрузки $I_{нг}$,

от которого все ступени защиты отстроены. При этом ток срабатывания основной ступени $I_{с30} > I_{нг}$ и ток срабатывания резервной ступени $I_{с3р} > I_{нг}$.

Быстродействующая ступень защиты также отстроена от повреждений в начале смежного участка Л2, т. е. от КЗ в точке К2 $I_{с30} > I_{КЗ К2}$.

При возникновении в момент времени t_1 КЗ выходной сигнал ЦФ начинает нарастать, изменяясь в соответствии с видом переходной характеристики фильтра (рис. 3). После превышения этим сигналом $I_{с3р}$ в моменты времени $t_{р4}$, или $t_{р3}$, или $t_{р2}$, определяемые видом указанной характеристики, срабатывают измерительные органы тока резервной ступени защиты и запускают орган выдержки времени. При дальнейшем увеличении выходного сигнала ЦФ, после превышения им $I_{с30}$ в моменты времени t_{04} , или t_{03} , или t_{02} , которые также зависят от вида переходной характеристики, срабатывают измерительные органы тока быстродействующей ступени защиты, разрешающие реализацию исполнительной команды.

По мере удаления точки повреждения от места установки защиты A_1 происходит снижение тока КЗ и его установившегося значения $I_{уст}$. Однако вполне очевидно, что при этом будет обеспечиваться четкое поведение всех ступеней микропроцессорной защиты при переходной характеристике ЦФ любого вида.

Особые условия для функционирования защиты с соответствующим видом указанной характеристики ЦФ будут возникать при повреждениях с токами КЗ, находящимися вблизи областей срабатывания и возврата ступеней.

Следует отметить, что при использовании ЦФ с монотонной переходной характеристикой все ступени токовой защиты в любых условиях функционируют устойчиво и действуют селективно.

При апериодической переходной характеристике ЦФ в случае повреждений с установившимся током КЗ $I_{КЗу}$, несколько меньшим токов срабатывания $I_{с30}$ и возврата $I_{во}$, из-за перерегулирования возможно срабатывание измерительного органа быстродействующей ступени (рис. 4).

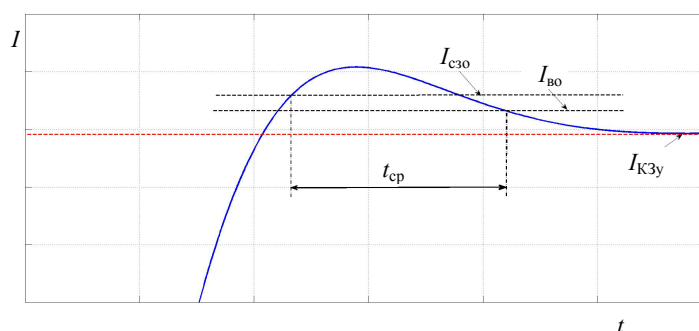


Рис. 4. К оценке поведения защиты при апериодической переходной характеристике

Fig. 4. Towards the protection behavior in case of aperiodic transient characteristic

Указанный орган в течение времени t_{cp} ЦФ будет находиться в срабатанном состоянии и определять поведение ступени защиты в целом. Такие ситуации могут возникать при повреждениях в конце участка Л1 за пределами зоны действия быстродействующей ступени защиты A_1 . При этом в случае КЗ в начале смежного участка Л2 в точке К2 возможно неселективное действие защиты.

Принимая во внимание, что $I_{сзо}$ выбирается из условия превышения его значением тока КЗ в точке К2 не менее чем в 1,1 раза [12], неселективного действия ступени не будет, если перерегулирование S не выходит за пределы 10 %. В противном случае исключение неселективной работы быстродействующей ступени может быть достигнуто за счет увеличения тока срабатывания $I_{сзо}$, что повлечет за собой сокращение зоны ее действия.

При корректно выбранных параметрах срабатывания медленнодействующей ступени защиты, исходя из обеспечения достаточной чувствительности, ток срабатывания $I_{сзр}$ более чем в 1,5 раза будет меньше минимального тока КЗ для зоны ближнего резервирования (участок Л1) и не менее чем в 1,2 раза для зоны дальнего резервирования (участок Л2) [12]. Благодаря этому работа данной ступени защиты в указанных выше особых условиях маловероятна, если не исключена вообще.

При колебательной переходной характеристике ЦФ функционирование быстродействующей ступени защиты в особых условиях будет в основном таким же, как и при апериодической. Возможность неселективного действия данной ступени достаточно оценивать по первому максимуму выходного сигнала фильтра (рис. 1). Следует отметить, что в особых условиях функционирование ее измерительного органа тока может быть неустойчивым (рис. 5). При этом выходной сигнал ЦФ, пропорциональный току КЗ $I_{КЗ}$, может превышать ток срабатывания $I_{сзо}$ и опускаться ниже тока возврата $I_{во}$. Параметр P , отражающий состояние измерительного органа, принимает значения: 1 – срабатывание в течение времени t_{cp} ; 0 – несрабатывание в течение времени $t_{нс}$.

Нарушение устойчивости функционирования органа выражается в его переключении из состояния срабатывания в состояние несрабатывания, и наоборот. Предотвращение неустойчивой работы в особых условиях может быть обеспечено за счет уменьшения тока возврата. Учитывая, что токи возврата и срабатывания связаны соотношением $I_{во} = k_{в}I_{сзо}$, где $k_{в}$ – коэффициент возврата, предложенное выше достигается выбором меньшего значения $k_{в}$.

При использовании ЦФ с колебательной переходной характеристикой особых условий в работе медленнодействующей ступени защиты не возникает, благодаря чему она функционирует устойчиво и с требуемой селективностью.

Приведенные положения и рекомендации основываются на результатах научных исследований, полученных авторами с использованием метода вычисленного эксперимента при синусоидальных или близких к ним воздействиях.

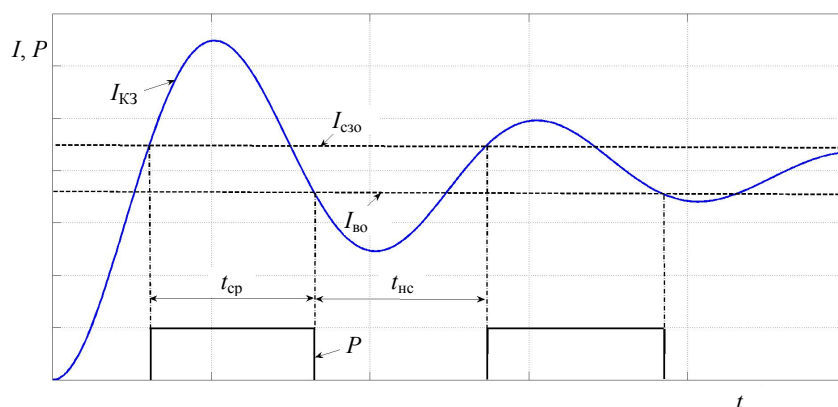


Рис. 5. К оценке поведения защиты при колебательной переходной характеристике цифрового фильтра

Fig. 5. Towards the protection behavior in case of oscillatory transient characteristics of digital filters

При сложных входных сигналах, приближенных к реальным вторичным токам трансформаторов тока, общие тенденции влияния переходных характеристик ЦФ на поведение микропроцессорной токовой защиты существенных изменений не претерпевают.

ВЫВОДЫ

1. Цифровые фильтры с монотонной переходной характеристикой обеспечивают устойчивое функционирование и селективное действие микропроцессорной токовой защиты при повреждениях на основном и смежном участках.
2. Фильтры с аperiodической переходной характеристикой способствуют неселективной работе быстродействующей ступени защиты при коротких замыканиях в начале смежного участка.
3. Цифровые фильтры с колебательной переходной характеристикой могут обуславливать неустойчивое функционирование быстродействующей ступени защиты в особых условиях, когда токи КЗ близки по значениям к токам срабатывания и возврата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей: учеб. пособие для вузов / А. М. Федосеев. М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.
2. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
3. 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>.

4. Фадке, А. Г. Компьютерная релейная защита в энергосистемах / А. Г. Фадке, Д. С. Торп. 2-е изд. М.: Техносфера, 2019. 370 с.
 5. Испытания микропроцессорных токовых защит: теория, моделирование, практика / И. В. Новаш, Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев. Минск: БНТУ, 2021. 168 с.
 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. Совершенствование алгоритма формирования ортогональных составляющих входных величин в микропроцессорных защитах / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев, И. В. Новаш // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 2. С. 95–108. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-95-108>.
 8. Формирование ортогональных составляющих входных токов величин в микропроцессорных защитах электроустановок / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев, И. В. Новаш // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 3. С. 191–201. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-191-201>.
 9. 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.
 10. Ерофеев, А. А. Теория автоматического управления / А. А. Ерофеев. СПб.: Политехника, 2022. 302 с.
 11. Гельфанд, Я. С. Релейная защита распределительных сетей / Я. С. Гельфанд. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1987. 368 с.
 12. Чернобровов, Н. В. Релейная защита электроэнергетических систем: учеб. пособие для техникумов / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. М.: Энергоатомиздат, 2007. 800 с.
- Поступила 27.12.2024 Подписана в печать 27.02.2025 Опубликовано онлайн 31.03.2025

REFERENCES

1. Fedoseev A. M. (1984) *Relay Protection of Electric Power Systems. Relay Protection of Networks*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 520 (in Russian)
2. Schneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
3. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V., 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).
4. Phadke A. G., Thorp J. S. (2009) *Computer Relaying for Power Systems*. 2nd ed. Chichester, John Wiley & Sons, Ltd., 326. <https://doi.org/10.1002/9780470749722>.
5. 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).
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. Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2021) Improvement of Algorithm for Formation of Orthogonal Components of Input Quantities in Microprocessor

- Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (2), 95–108. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-95-108> (in Russian).
8. Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2021) Formation of Orthogonal Components of Input Currents in Microprocessor Protections of Electrical Equipment. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (3), 191–201. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-191-201> (in Russian).
 9. 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).
 10. Erofeev A. A. (2008) *Automatic Control Theory*. Saint Petersburg, Politekhnik Publ. 302 (in Russian).
 11. Gel'fand Ya. S. *Relay Protection of Distribution Networks*. 2nd Ed. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 368 p. (in Russian).
 12. Chernobrovov N. V., Semenov V. A. (1998) *Relay Protection of Electric Energy Grids: Textbook for Technical Schools*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 800 (in Russian).

Received: 27 December 2024 Accepted: 27 February 2025 Published online: 31 March 2025

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-111-127>

УДК 621.311.1

Потери энергии в конструктивных элементах электрооборудования при нарушении симметрии параметров режима электропередачи

Н. Л. Новиков¹⁾, Р. А. Нечитаев²⁾, М. А. Кашин³⁾

¹⁾Россети Научно-технический центр (Москва, Российская Федерация),

²⁾Научно-исследовательский институт энергетических сооружений (Москва, Российская Федерация),

³⁾Белэнергосетьпроект (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Исследована несимметрия параметров режима электропередачи при возникновении индукционного тока в конструктивных элементах электрооборудования. Вращающееся магнитное поле, производимое трехфазным переменным током, влияет на симметричность системы электропередачи, при нарушении которой появляется индукционный ток, вызывающий дополнительные нагревы электрооборудования. При нахождении потягосцепления с объектом исследования, обусловленного нескомпенсированным магнитным полем, расчет выполнен с помощью уравнения Пуассона для векторного магнитного потенциала. Приведены основные соотношения для расчета несимметричного режима с учетом потерь в земле с помощью метода симметричных составляющих. Для расчета и верификации индукционных нагревов предложен параметрический синтез баланса энергии в конструктивных элементах электрооборудования, расположенного на открытом воздухе, учитывая процессы естественной конвекции, излучения и теплопроводности. На термограммах силового трансформатора и порталной опоры на оттяжках показаны дополнительные потери энергии от индукционных токов. Расчет электропередачи по воздушной линии электропередачи (ВЛ) с учетом взаимной индукции несущей конструкции проводится в трехфазной системе векторов и в преобразованной системе по методу симметричных составляющих для случая продольной несимметрии. Учет сопротивления земли ведет к изменению соотношения активной и реактивной составляющих – активные потери мощности возрастают, а реактивные становятся меньше, соответственно угол нагрузки уменьшается. Дополнительные потери электроэнергии, возникающие в несбалансированном и несимметричном режиме работы электроустановки, не учтены в нормативных документах Российской Федерации. Предложены мероприятия по снижению потерь энергии в приведенных примерах и выполнен технико-экономический расчет для ВЛ. Результат работы может быть полезен при проектировании и модернизации силовых трансформаторов и воздушных линий электропередачи.

Ключевые слова: баланс энергии, параметрический синтез, векторный магнитный потенциал, несимметрия, напряжение смещения нейтрали, метод симметричных составляющих, несущая конструкция, индукционный ток, индукционный нагрев, уравнение теплопроводности, сопротивление земли, верификация, магнитный шунт, управляемые самокомпенсирующиеся воздушные линии, снижение потерь энергии

Для цитирования: Новиков, Н. Л. Потери энергии в конструктивных элементах электрооборудования при нарушении симметрии параметров режима электропередачи / Н. Л. Новиков, Р. А. Нечитаев, М. А. Кашин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 2. С. 111–127. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-111-127>

Адрес для переписки

Нечитаев Роман Александрович
Научно-исследовательский институт
энергетических сооружений
Строительный проезд, дом 7А, корпус 29,
125362, г. Москва, Российская Федерация
Тел. +7 495 727-36-05 #3114
mangerok@mail.ru

Address for correspondence

Nechitaev Roman A.
Scientific Research Institute
of Energy Structures
Stroitelny proezd, 7A/29,
125362, Moscow, Russian Federation
Tel. +7 (495) 727-36-05 #3114
mangerok@mail.ru

Structural Elements Energy Losses of Electrical Equipment due to a Violation of Symmetry of Power Transmission Mode Parameters

N. L. Novikov¹⁾, R. A. Nechitaev²⁾, M. A. Kashin³⁾

¹⁾Rosseti R&D Center (Moscow, Russian Federation),

²⁾Scientific Research Institute of Energy Structures (Moscow, Russian Federation),

³⁾Belenergonetproject (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The asymmetry of power transmission mode parameters due to the induction current effect on structural elements of electrical equipment is investigated. Three-phase AC current produces a rotating magnetic field that affects the power transmission system symmetry, and when it is violated, the induction current appears that causes additional heating of the electrical equipment. To find the flux linkage with research object caused by uncompensated magnetic field, a calculation was performed using the Poisson equation for vector magnetic potential. The symmetrical components method is used to calculate power losses in the asymmetric mode, taking into account losses in the ground. There is proposed a parametric synthesis of energy balance in structural elements of outdoors electrical equipment to calculate and verify the induction heating, taking into account the processes of natural convection, radiation and thermal conductivity. There are shown the thermograms of power transformer and gantry pillars on guy rods to open the additional energy losses caused by induction currents. Calculation of power transmission via overhead line taking into account the mutual induction of supporting structure was carried out in a three-phase vector system and in a transformed system using the symmetrical component method for the case of longitudinal asymmetry. Accounting the earth's resistance leads to a change in the ratio of active and reactive components, i.e. active power losses increase, and reactive ones become smaller, and, correspondingly, the load angle decreases. There are proposed the solutions in above examples to reduce additional energy losses and a technical and economic benefits for overhead line is performed. The result of the work can be useful in the design and modification of power transformers and overhead power transmission lines.

Key words: energy balance, parametric synthesis, vector magnetic potential, symmetrical component method, magnetic field asymmetry, neutral bias voltage, supporting structure, induction current, induction heating, heat equation, earth resistance, verification, magnetic shunt, controlled self-compensating overhead lines, energy losses reduction

For citation: Novikov N. L., Nechitaev R. A., Kashin M. A. (2025) Structural Elements Energy Losses of Electrical Equipment due to a Violation of Symmetry of Power Transmission Mode Parameters. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (2), 111–127. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-111-127> (in Russian)

Введение

После утверждения ведомственного документа [1] обоснование и расчет нормативов технологических потерь электроэнергии по инструкции [2] на основе нормативных характеристик по классическим законам электротехники потеряли роль управления на технико-экономическом уровне, что фактически упразднило актуальность проблемы снижения технических потерь энергии (ПЭ). Совершенствование методики расчетов и повышения объективности нормирования технологических потерь необходимо для определения приоритета и расхода финансовых и материальных ресурсов на снижение потерь [3]. Так, например, для предотвращения вихрековых нагревов арматура воздушной линии электропередачи (ВЛ) должна выполняться из немагнитных материалов, для предотвращения ПЭ в грозотросовых контурах применяется одностороннее заземление. Однако осталось

без внимания, что в несущих конструктивных элементах электрооборудования (ЭО) тоже индуцируются токи, которые приводят к нарушению симметрии параметров режима и дополнительным ПЭ [4], что и должно учитываться как составляющая технических потерь.

Важнейшее значение в организации, проведении исследований и решении проблем повышения эффективности передачи электроэнергии на дальние расстояния по ВЛ принадлежит коллективам Московского энергетического института, института «Энергосетьпроект» и его отделений, Санкт-Петербургского политехнического университета (ЛПИ), Новосибирского государственного технического университета (бывший НЭТИ), Белорусского национального технического университета, Института энергетики Академии наук Молдовы, НТЦ Электроэнергетики и Сибирского института энергетики (СибНИИЭ) Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы, предприятия «Союзтехэнерго» (ОРГРЭС), Всероссийского научно-исследовательского института энергетики (ВНИИЭ). Большой вклад внесли работы В. А. Веникова, В. К. Щербакова, М. Л. Левинштейна, К. П. Кадомской, В. М. Чебана, С. С. Рокотяна, Г. Е. Поспелова, Т. Г. Поспеловой, В. М. Постолатий, Е. В. Быковой, Г. Н. Александрова, Ю. С. Железко, Ю. Г. Шакаряна, В. Э. Воротницкого, Л. В. Тимашовой и др.

Методика расчета мощности в несбалансированном и несимметричном режиме определена в зарубежном стандарте IEEE [5], проблемы качества функционирования воздушных линий электропередачи высокого напряжения при возникновении кондуктивных электромагнитных помех и способы повышения энергоэффективности электросетевых конструкций рассмотрены в [6]. В [7] показан пример вычисления потерь электроэнергии в несимметричном режиме программным методом по данным измерений параметров электросети на действующей линии электропередачи. История применения управляемых гибких линий электропередачи в электрических сетях энергосистем опубликована в [8].

Параметрический синтез баланса энергии в конструктивных элементах электрооборудования

Баланс электрической энергии. На схеме замещения трехфазная электроустановка представляется в виде источника электродвижущей силы (ЭДС) и полного сопротивления элемента каждой фазы. При этом необходимо учитывать взаимное влияние вращающегося магнитного поля в окружающем пространстве с несущими конструктивными элементами, как показано на рис. 1.

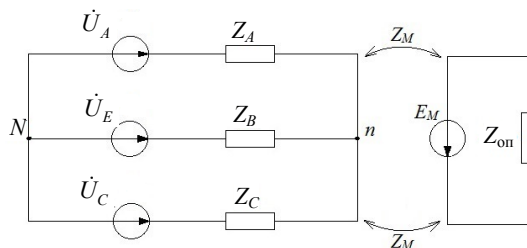


Рис. 1. Схема замещения трехфазной электроустановки с несущей конструкцией

Fig. 1. Equivalent circuit of a three-phase installation with supporting structure

При математическом моделировании переменное магнитное поле записывается как дифференциальное уравнение 2-го порядка (неоднородное дифференциальное уравнение Лапласа или уравнение Пуассона) относительно векторного магнитного потенциала \vec{A} [9]

$$\Delta \vec{A} = -q_0, \quad (1)$$

где Δ – векторный лапласиан; q_0 – функция источника неоднородности вращающегося магнитного поля (несимметрия).

Комплексное взаимное сопротивление Z_M между электроустановкой (ЭУ) и несущей конструкцией с внутренним сопротивлением $Z_{\text{ОП}}$ (рис. 1) определяется по коэффициенту взаимоиндукции и величине потокосцепления Ψ

$$E_M(t) = -\frac{\partial \Psi}{\partial t} = -M \frac{\partial i}{\partial t} = -j\omega M I. \quad (2)$$

Для нахождения магнитного потока Φ , производимого током i , рассчитывается двойной интеграл магнитной индукции \vec{B} в площади взаимодействия S или криволинейный интеграл вдоль контура взаимодействия длиной l от векторного магнитного потенциала \vec{A}

$$\Phi = \iint_S \vec{B} d\vec{S} = \iint_S \text{rot} \vec{A} d\vec{S} = \oint_l \vec{A} d\vec{l}. \quad (3)$$

Задача расчета магнитного потока сквозь замкнутый контур сводится к нахождению величины векторного магнитного потенциала на границах этого контура:

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \frac{\vec{\delta}}{r} dV = \frac{\mu i}{4\pi} \int \frac{[d\vec{y}, \vec{r}_0]}{r} = \frac{\mu i}{4\pi} \int_m^{r_n} \frac{d\vec{r}}{\text{tg}\alpha \cdot r}, \quad (4)$$

$$\Phi(\vec{r}) = \frac{\mu i \cdot \cos \alpha}{4\pi \cdot \text{tg}\alpha} \sum_{m=1}^{n=\infty} \int_{l_m}^{l_n} \int_{r_m}^{r_n} \frac{d\vec{l} \cdot d\vec{r}}{r}, \quad (5)$$

$$M = \frac{\mu \cos^2 \alpha}{4\pi \sin \alpha} \sum_{m=1}^{n=\infty} \int_{l_m}^{l_n} \int_{r_m}^{r_n} \frac{d\vec{l} d\vec{r}}{r}, \quad (6)$$

где $d\vec{y}$ – элемент длины проводника, м; \vec{r}_0 – единичный вектор, проведенный от $d\vec{y}$ к точке, в которой подсчитываем векторный потенциал; r – расстояние от элемента длины проводника до точки расчета векторного магнитного потенциала, м; α – угол между направлением векторного магнитного потенциала элемента тока и контуром потокосцепления; m, n – границы участков интегрирования контура потокосцепления; M – коэффициент взаимоиндукции между ЭУ и объектом исследования, Гн.

Введение дополнительного сопротивления в схему замещения ЭУ ведет к продольной несимметрии [10]. Одним из определяющих параметров, характеризующих (не)симметрию электропередачи переменного тока и напряжения, является напряжение смещения нейтрали, определяемое из соотношения

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}, \quad (7)$$

где $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ – комплексные фазные напряжения ЭУ; Y_A, Y_B, Y_C – комплексные фазные проводимости ЭУ.

В таком случае при неравенстве одного из сопротивлений фазы $Z_A = Z_C \neq Z_B$ уравнение (7) преобразуется в следующее:

$$\dot{U}_{nN} = \dot{U}_\phi e^{j\varphi} \frac{Z_B - Z_{A,C}}{Z_{A,C} + 2Z_B}, \quad (8)$$

где Z_A, Z_B, Z_C – комплексные фазные сопротивления ЭУ.

Для освобождения от электродинамической линейной зависимости трехфазной системы токов и напряжений, показанной на рис. 1, в расчетах применяют метод симметричных составляющих. В таком случае падение напряжения на ЭУ запишется в виде алгебраической суммы компонентов прямой, обратной и нулевой последовательностей фаз [11]

$$\Delta \dot{U}(\dot{I}_{лЭП}) = \dot{I}_A(Z_A - Z_M) + \dot{I}_B Z_B + \dot{I}_C(Z_C - Z_M) = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_2 Z_2 + \dot{I}_0 Z_0, \quad (9)$$

где $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ – комплексные фазные токи ЭУ; Z_A, Z_B, Z_C – комплексные фазные сопротивления ЭУ; $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_0$ – комплексные токи прямой, обратной и нулевой последовательностей ЭУ; Z_1, Z_2, Z_0 – комплексные сопротивления ЭУ прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Так как сопротивления фаз оказываются различными вследствие электромагнитного влияния несущей конструкции и перемещаются друг относительно друга, например из-за транспонировки в случае ВЛ, сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей также будут различны (коэффициенты связи – переменные величины (рис. 2)):

$$Z_1 = Z_\phi; \quad (10)$$

$$Z_2 = Z_{\text{ОП}}/N; \quad (11)$$

$$Z_0 = R + 3r_3 + j0,435 \lg \frac{D}{\sqrt[3]{d^2 p}}, \quad (12)$$

$$Z_M = r_3 L + j\omega M L, \quad (13)$$

где Z_ϕ – комплексное сопротивление фазы ЭУ, Ом; $Z_{\text{ОП}}$ – комплексное сопротивление несущей конструкции ЭУ, Ом; N – количество единиц электрообо-

рудования с несущей конструкцией (число опор ВЛ), ед.; R – активное сопротивление фазы, Ом; r_3 – сопротивление земли на частоте 50 Гц, Ом/км; L – длина ВЛ, км; D – глубина залегания линии обратного тока, м; d – среднегеометрическое расстояние между фазами, м; p – эквивалентный радиус провода, м.

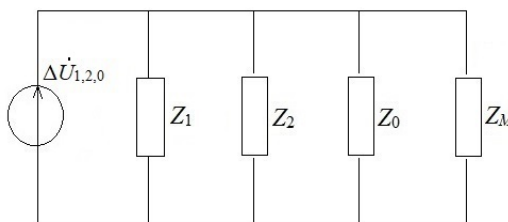


Рис. 2. Трансформация схемы замещения ЭУ с помощью метода симметричных составляющих

Fig. 2. Three-phase alternative current installation transformation by the symmetrical components' method

Симметричные составляющие падений напряжений в соответствии с (9):

$$\Delta \dot{U}_1 = \frac{1}{3}(\Delta \dot{U}_A + a \cdot \Delta \dot{U}_B + a^2 \cdot \Delta \dot{U}_C); \quad (14)$$

$$\Delta \dot{U}_2 = \frac{1}{3}(\Delta \dot{U}_A + a^2 \cdot \Delta \dot{U}_B + a \cdot \Delta \dot{U}_C); \quad (15)$$

$$\Delta \dot{U}_0 = \frac{1}{3}(\Delta \dot{U}_A + \Delta \dot{U}_B + \Delta \dot{U}_C). \quad (16)$$

Когда появляется продольная несимметрия электропередачи вследствие увеличения сопротивления в одной из фаз на величину Z_M , ток прямой последовательности для системы симметричных составляющих определяется с учетом эквивалентного суммарного сопротивления [12]

$$\dot{I}_1 = \frac{\Delta \dot{U}_1}{Z_1 + Z_\Delta}, \quad (17)$$

где Z_Δ – результирующее сопротивление относительно точки несимметрии, определяемое по формуле

$$\frac{1}{Z_\Delta} = \frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z_2} + \frac{3}{Z_M}. \quad (18)$$

Токи обратной и нулевой последовательностей определяются по следующим соотношениям:

$$\dot{I}_2 = -\frac{Z_\Delta}{Z_2} \cdot \dot{I}_1; \quad (19)$$

$$\dot{I}_0 = -\frac{Z_\Delta}{Z_0} \cdot \dot{I}_1. \quad (20)$$

Определяющим параметром по току обратной последовательности (19) становится характеристика Z_2 или комплексное полное сопротивление несущей конструкции.

Потери мощности в таком случае складываются из составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей [5]:

$$\Delta S_{ABC} = |\Delta P_A + \Delta P_B + \Delta P_C + j(\Delta Q_A + \Delta Q_B + \Delta Q_C)|; \quad (21)$$

$$\Delta S_1 = 3\Delta U_1 I_1 \cos \varphi_1 + 3\Delta U_1 I_1 \sin \varphi_1 = |\Delta P_1 + j\Delta Q_1|; \quad (22)$$

$$\Delta S_2 = 3\Delta U_2 I_2 \cos \varphi_2 + 3\Delta U_2 I_2 \sin \varphi_2 = |\Delta P_2 + j\Delta Q_2|; \quad (23)$$

$$\Delta S_0 = 3\Delta U_0 I_0 \cos \varphi_0 + 3\Delta U_0 I_0 \sin \varphi_0 = |\Delta P_0 + j\Delta Q_0|; \quad (24)$$

$$\Delta S_{120} = |\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_0 + j(\Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \Delta Q_0)|. \quad (25)$$

При записи приведенных уравнений баланса электрической энергии в ЭУ не учитывались поперечные составляющие тока утечки и тока проводимости, связанные с энергией электрического поля, что не вносит существенных погрешностей для частот до 1 МГц и удельного сопротивления грунта не более 100 Ом·м [13]. Также при вычислении интегралов (3)–(6) для нахождения потокосцепления с объектом не учитывалось влияние магнитного поля, инициируемого токами в земле.

Баланс тепловой энергии. Исходя из первого закона термодинамики тепловой баланс энергии в конструктивных элементах ЭО представляется следующим уравнением:

$$Q_{\text{Дж}} + Q_{\text{Сол}} = \Delta Q + \Delta Q_{\text{Из}} + \Delta Q_{\text{К}} + \Delta Q_{\text{ТПР}}, \quad (26)$$

где $Q_{\text{Дж}}$ – тепловая энергия от нагрева электрическим током несущей конструкции, Дж; $Q_{\text{Сол}}$ – количество теплоты, получаемое при поглощении солнечной энергии несущей конструкцией, Дж; ΔQ – внутренняя энергия несущей конструкции, Дж; $\Delta Q_{\text{Из}}$ – энергия, излучаемая нагретой частью несущей конструкции, Дж; $\Delta Q_{\text{К}}$ – тепловой поток конвективного охлаждения поверхности несущей конструкции окружающей средой, Дж; $\Delta Q_{\text{ТПР}}$ – энергия, затрачиваемая на теплопроводность в несущей конструкции, Дж.

Работа, совершаемая силой тока, по закону Джоуля–Ленца

$$Q_{\text{Дж}} = I^2 R t = P t, \quad (27)$$

где I – сила тока, А; R – сопротивление конструктивного элемента ЭО электрическому току, Ом; t – продолжительность нагрева, с; P – мощность нагрева, Вт.

Сопротивление проводника зависит от температурного коэффициента электрического сопротивления, поэтому для расчетов токоведущих проводников в (27) необходимо учитывать это изменение, однако в случае контактных сопротивлений пересчет не требуется.

Энергия $\Delta Q_{\text{из}}$, излучаемая нагретой до температуры T конструкцией, определяется по ее светимости (закон Стефана–Больцмана) из расчета на площадь поверхности излучения F и температуру окружающей среды T_0

$$\Delta Q_{\text{из}} = \varepsilon \sigma F (T^4 - T_0^4). \quad (28)$$

Тепловой поток $\Delta Q_{\text{к}}$ конвективного охлаждения поверхности конструкции окружающей средой определяется из следствия закона Фурье с учетом площади охлаждаемой поверхности

$$\Delta Q_{\text{к}} = \theta F (T - T_0), \quad (29)$$

где $\theta = 5,6 + 4v$ – коэффициент конвективной теплоотдачи при условии плоской поверхности конструкции на открытом воздухе, Вт/м²·К; v – скорость ветра, м/с [14, с. 470].

Количество теплоты $Q_{\text{сол}}$ (лучистой энергии солнца), поглощаемое конструкцией, зависит от района инсоляции и определяется на метр квадратный поверхности объекта

$$Q_{\text{сол}} = OF, \quad (30)$$

где O – мощность потока солнечного излучения, Вт/м².

Энергия $\Delta Q_{\text{тпр}}$, затрачиваемая на теплопроводность в несущей конструкции, для установившегося режима

$$\Delta Q_{\text{тпр}} = \frac{\lambda_{\text{T}} s t \Delta T}{l} = \frac{\Delta T}{R_{\text{T}}} t = \sigma_{\text{T}} \Delta T t, \quad (31)$$

где λ_{T} – коэффициент теплопроводности материала проводника (контакта), Вт/(м·К); s – площадь поперечного сечения проводника теплоты, м²; ΔT – разность температур по концам участка проводимости теплоты, °С; l – длина участка проводимости теплоты, м; t – продолжительность процесса теплопроводности, с; R_{T} – тепловое сопротивление проводника, К/Вт; σ_{T} – тепловая проводимость проводника, Вт/К.

Внутренняя энергия ΔQ такой системы в установившемся режиме

$$\Delta Q = cm\Delta T = C(T - T_{\text{Н}}), \quad (32)$$

где c – удельная теплоемкость материала проводника (контакта), Дж/(кг·К); m – масса конструкции, кг; T – установившаяся температура конструкции, К; $T_{\text{Н}}$ – начальная температура конструкции, К; C – теплоемкость системы, Дж/К.

Достижение установившегося режима при подстановке (27)–(32) в (26) описывается уравнением баланса тепловой энергии для участка электрической цепи с током, характеризующегося постоянной времени нагрева t :

$$(P + OF)t = C\Delta T + \sigma_{\text{T}}\Delta T t + \theta F(T - T_0)t + \varepsilon \sigma F(T^4 - T_0^4)t. \quad (33)$$

В стационарном режиме изменение внутренней энергии не происходит и уравнение переходит в баланс мощности тепловых потоков

$$P = \theta F(T - T_0) + \varepsilon \sigma F(T^4 - T_0^4) - \sigma_T(T_0 - T). \quad (34)$$

Дифференциальная форма записи учитывает градиент температурного поля нагрева контактного соединения конструкции

$$P + OF = C \frac{\partial T}{\partial t} - \sigma_T \text{grad} T + \theta F(T - T_0) + \varepsilon \sigma F(T^4 - T_0^4). \quad (35)$$

При малых превышениях температуры (до 5 градусов) нагрева конструктивных элементов ЭО над окружающей средой мощность потока излучения ΔQ из эквивалентна линейной зависимости, таким образом уравнение баланса энергии приводится к параболическому виду

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_T}{c \cdot \rho_V} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\theta + \varepsilon \cdot \sigma \cdot 10^8}{c \cdot \rho_V} \cdot (T - T_0) + \frac{\rho_S \cdot j^2 + O}{c \cdot \rho_V}, \quad (36)$$

где ρ_S – удельное электрическое сопротивление контакта конструкции, Ом·м; c – удельная теплоемкость контакта конструкции, Дж/(кг·К); ρ_V – удельная массовая плотность контакта конструкции, кг/м³; j – плотность индукционного тока в контуре конструкции, А/м².

Классическая форма записи параболического уравнения теплопроводности [15]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - bT + q, \quad (37)$$

где $a = \frac{\lambda}{c \rho_V}$ – коэффициент температуропроводности; $b = \frac{(\theta + \varepsilon \cdot \sigma \cdot 10^8)}{c \cdot \rho_V}$ –

коэффициент теплообмена; $q = \frac{\rho_S \cdot j^2 + O + (\theta + \varepsilon \cdot \sigma \cdot 10^8) \cdot T_0}{c \cdot \rho_V}$ – тепловые

источники.

Основные результаты

Основной причиной возникновения индукционных токов в конструктивных элементах ЭО является появление несимметрии векторного магнитного потенциала (1) вращающегося переменного магнитного поля вследствие разных токов нагрузки по фазам и присоединениям, деформации или изменения в процессе эксплуатации геометрической формы конструктивных элементов, технологической особенности конструкции ЭУ, неправильного монтажа и отклонения от заводской конструкции. Например, деформация обмоток трехфазного трансформатора (рис. 3), трехфазная сеть тягового (однофазного) железнодорожного транзита [16], порталные опоры на оттяжках (ПБ-500) воздушных линий электропередачи (рис. 4), экраны генераторных токопроводов [17] и т. д.

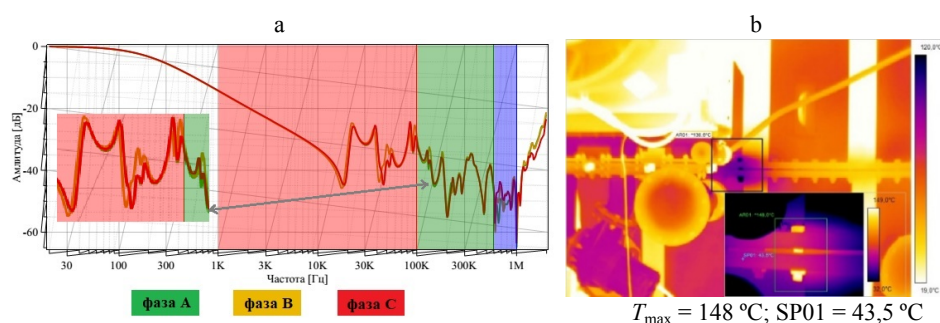


Рис. 3. Диагностические признаки изменения конструктивных параметров трансформатора 125 МВА (межфазное отклонение по сопротивлению короткого замыкания фазы В более 3 %): а – признаки деформации обмоток трансформатора при снятии амплитудно-частотных характеристик (ГОСТ 59329–2020, сквозная схема с закороткой); б – термограмма нагрева болта колокола

Fig. 3. Diagnostic features of changes in the design parameters of a 125 MVA power transformer (deviation in short-circuit resistance of phase B more than 3 %): а – signs of the transformer windings deformation when amplitude-frequency characteristics are being scoped (GOST 59329-2020, end-to-end circuit with a short-circuit); б – heating thermogram of the bell bolt

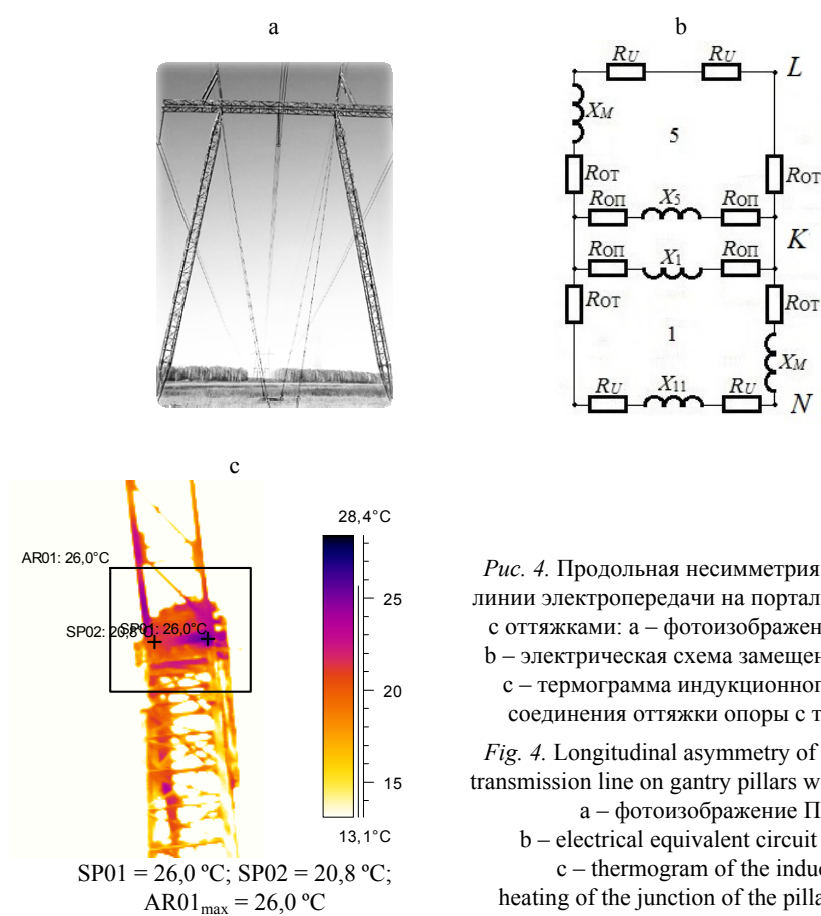


Рис. 4. Продольная несимметрия воздушной линии электропередачи на порталных опорах с оттяжками: а – фотоизображение ПБ-500; б – электрическая схема замещения ПБ-500; в – термограмма индукционного нагрева соединения оттяжки опоры с траверсой

Fig. 4. Longitudinal asymmetry of an overhead transmission line on gantry pillars with guy wires: а – фотоизображение ПБ-500; б – electrical equivalent circuit ПБ-500; в – thermogram of the induction heating of the junction of the pillar guy wire with the traverse

Потери мощности в одном болте колокола силового трансформатора, обусловленные несимметрией вращающегося магнитного поля вследствие деформации обмотки фазы B , нагретого индукционным током в среднем на $130\text{ }^\circ\text{C}$ при скорости ветра 1 м/с , как показано на рис. 3, согласно уравнению (34), составят

$$P = 9,6 \cdot 0,01 \cdot 130 + 0,94 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,01 \times \\ \times (413^4 - 283^4) - 2 \cdot 104,5 \approx 234\text{ Вт.} \quad (38)$$

Индукционный нагрев (рис. 3b) соответствует величине магнитной индукции [18]

$$B_m = \sqrt{\frac{P \cdot 2\rho}{f_E v^2 h^2 V \cdot 10^{-12}}} = \sqrt{\frac{234 \cdot 2 \cdot 10^{-5}}{1 \cdot 50^2 \cdot 2^2 \cdot 47}} \cdot 10^{12} = 9978,7\text{ Гс} \approx 1\text{ Тл}, \quad (39)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала, Ом·см; f_E – коэффициент формы кривой ЭДС-взаимоиндукции; v – частота, Гц; h – диаметр стержня, см; B_m – магнитная индукция, Тл; V – объем тела, см³.

На рис. 4 приведен пример индукционного нагрева ПБ-500, обусловленный нескомпенсированным магнитным полем средней фазы, и, как следствие, появления продольной несимметрии в воздушной линии электропередачи.

В сравнении с предыдущим примером потери мощности в одном соединении оттяжки опоры с траверсой, нагретом в среднем на $3\text{ }^\circ\text{C}$, согласно уравнению (34), составят

$$P = 9,6 \cdot 0,01 \cdot 3 + 0,94 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,01 \times \\ \times (291^4 - 288^4) + 0,25 \cdot 3 \approx 1,19\text{ Вт.} \quad (40)$$

Индукционный ток во время проведения измерений равен 6 А , что соответствует джоулевому тепловыделению (27) $1,2\text{ Вт}$ и среднему сопротивлению контакта 33 мОм (случай появления индукционного тока только в контуре № 1 опоры (рис. 4)) [19].

Индукционный ток в оттяжках может быть верифицирован по второму закону Кирхгофа

$$\dot{i}_{GUY} = \frac{\dot{E}_M}{Z_{\text{ПР}}} + \frac{\dot{E}_M}{Z_{\text{ОБ}}} = \dot{E}_M \left(\frac{1}{Z_{\text{ПР}}} + \frac{1}{Z_{\text{ОБ}}} \right) = \dot{E}_M \cdot Z_{\text{ПБ-500}}, \quad (41)$$

где $Z_{\text{ПР}} = R_{L,N} + Z_K Z_{N,L} / (Z_K + Z_{N,L})$ – комплексное прямое сопротивление ветвей L и N , Ом; $Z_{\text{ОБ}} = (R_{L,N} Z_{N,L} + R_{L,N} Z_K + Z_{N,L} Z_K) / Z_K$ – комплексное об-

ратное сопротивление ветвей L и N , Ом; $Z_{L,N} = R_{L,N} + jX_{1+5}$, $Z_K = R_K + jX_{1,5}$ – комплексные сопротивления ветвей L , K , N , Ом; $Z_{ПБ-500}$ – комплексное полное сопротивление опоры ПБ-500, Ом; $R_L = 2(R_U + R_{OT})$, $R_K = R_{OP}$, $R_N = 2(R_U + R_{OT})$ – активное сопротивление ветвей L , K , N соответственно, Ом; R_U – сопротивление контактов крепления оттяжек к анкерной плите, Ом; R_{OT} – сопротивление контакта крепления оттяжки к опоре, Ом; R_{OP} – сопротивление контакта соединения траверсы со стойкой опоры, Ом; E_M – электродвижущая сила взаимоиндукции контуров 1 и 5, В; $X_{1,5}$, X_{11} – сопротивление самоиндукции контуров 1, 5 и их объединения, Ом.

На рис. 5 показана зависимость вероятностной величины индукционной потери энергии в ПБ-500 от средней величины контактного сопротивления соединений конструктивных элементов при токе нагрузки 550 А для случаев статистической выборки: 10 % – все контакты рабочие; 30 % – большое сопротивление одного анкерного узла; 60 % – большое сопротивление соединений portalной опоры; $M(P)$ – математическое ожидание потери энергии в portalной опоре на оттяжках [20].

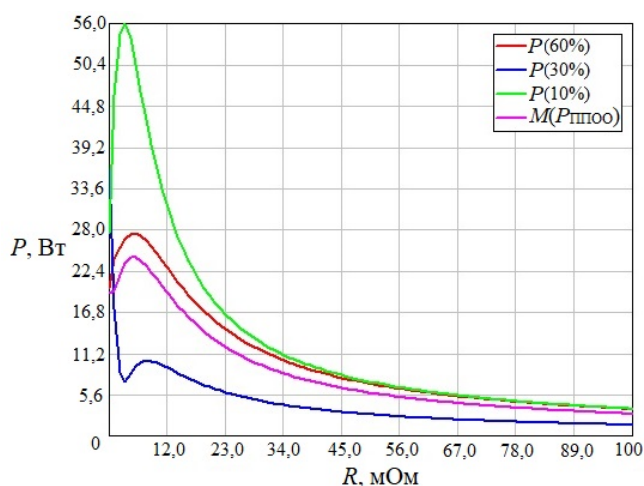


Рис. 5. Потери мощности индукционного нагрева в portalной опоре ПБ-500

Fig. 5. Power losses of induction heating in the portal support PB-500

В табл. 1 сведены результаты аналитических расчетов потерь электроэнергии в транспонированной воздушной линии электропередачи класса напряжения 500 кВ с учетом взаимоиндукции несущей конструкции трехфазной системы и с помощью метода симметричных составляющих по формулам (7)–(25).

Учет сопротивления земли и второй гармоники при определении потерь мощности в ЭУ высокого и сверхвысокого классов напряжения (эксплуатация с глухозаземленной нейтралью) влияет на соотношение активной и реактивной мощностей – активные потери становятся больше, а реактивная составляющая меньше, соответственно угол нагрузки уменьшается.

Таблица 1

Результат расчета несимметричного режима электропередачи
транспонированной ВЛ-500 на порталых опорах с оттяжками ($Z_{\text{оп}} = 0,132 + j0,023$)
для местности с глубиной залегания линии обратного тока 1700 м

Electric energy losses of asymmetric power transmission mode
overhead line 500 kV on gantry pillars with guy wires ($Z_{\text{GP}} = 0,132 + j0,023$)
for area with a return current line depth of 1700 m

Данные АСУ								
U_1 , кВ	U_2 , кВ	P_1 , МВт	P_2 , МВт	Q_1 , МВар	Q_2 , МВар	$\Delta P_{\text{н}}$, МВт	$P_{\text{к}}$, МВт	L , км
513,9	507	187,2	180,7	-33,8	166,3	0,93	0,64	192,9
Расчет трехфазной системы векторов								
ΔP , МВт	ΔQ , МВт	ΔP^* , МВт	ΔQ^* , МВт	Угол нагрузки φ , град	Угол нагрузки φ^* , град			
0,8416	8,886	0,8408	8,66	84,62°	84,45			
Расчет по (7)–(25)								
ΔP_1 , МВт	ΔP_2 , кВт	ΔP_0 , Вт	ΔQ_1 , МВар	ΔQ_2 , кВар	ΔQ_0 , Вар	ΔP_{120} , МВт	ΔQ_{120} , МВар	φ_{120} , град.
0,84	44,4	0,285	8,718	25,57	1,33	0,8844	8,7435	84,22
Влияние взаимоиנדукции ПБ-500								
$\Delta P - \Delta P^*$, кВт	$\Delta Q - \Delta Q^*$, кВар	$\varphi - \varphi^*$						
1,0	280,0	-0,17°						
Учет второй гармоники								
$\Delta P_{120} - \Delta P^*$, кВт	$\Delta Q_{120} - \Delta Q^*$, кВар	$\varphi_{120} - \varphi^*$						
43,6	83,5	-0,23°						
* Расчет для трехфазной системы с учетом влияния взаимоиנדукции несущей конструкции ВЛ, но без учета сопротивления земли.								

Мероприятия по снижению потери энергии в конструктивных элементах электрооборудования

Эксплуатация электрооборудования при появлении термических нагревов в несущих конструкциях теряет энергетическую эффективность. Возникновение индукционных токов в конструктивных элементах является признаком нарушения симметрии векторного магнитного потенциала (1) многофазного (трехфазного) вращающегося магнитного поля и, значит, изменения электротехнических параметров оборудования. Поэтому убрать или не допустить индукционный ток в несущей конструкции – значит улучшить энергетическую эффективность. Дополнительные нагревы также являются опасными для обслуживающего персонала и снижают функцию надежности работы оборудования, что является дополнительным фактором для проведения модернизации.

В случае нагрева болтов колокола силовых трансформаторов применяют магнитные шунты, балансирующие векторные магнитные потенциалы области несимметрии.

В примере с ПБ-500 модификация [21] замкнутого контура при применении анкерных плит с отдельными крюками на каждую оттяжку позво-

ляет ограничить величину индукционного тока и одновременно повысить общую надежность несущей конструкции ВЛ. Комплексная модернизация [22] управляемой самокомпенсирующейся воздушной линии (УСВЛ) с несколькими цепями в «одном окне», настроенных синфазно, в противофазе или с управляемым плавным регулированием фазового сдвига от 0 до 180 электрических градусов позволяет компенсировать внешнее магнитное поле. В случае противофазной настройки двух цепей производимое ими переменное магнитное поле в окружающем пространстве самокомпенсируется и векторный магнитный потенциал в несущей конструкции отсутствует. Таким образом, экономия ненормированных ПЭ от индукционного нагрева для новой УСВЛ на порталных опорах с оттяжками при среднегодовой нагрузке 550 А на 100 км в год, в соответствии с графиком на рис.5, составит

$$W_{\text{ППО}} = P_{\text{уд}} l k_{\text{И}} T = 33,9 \cdot 100 \cdot 0,9 \cdot 8760 \approx 26726 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год}, \quad (42)$$

где $P_{\text{уд}}$ – мощность индукционного нагрева новых порталных опор на оттяжках на 1 км ВЛ, Вт/км; l – длина участка ВЛ, км; $k_{\text{И}}$ – коэффициент использования опор данного типа от общего числа опор ВЛ, о. е.; T – число часов использования ВЛ в году, ч [23].

ВЫВОДЫ

1. Предложен параметрический синтез баланса энергии в конструктивных элементах электрооборудования при нарушении симметрии параметров режима электропередачи.
2. Предложен метод определения и верификации величины дополнительных технических потерь энергии в опорах ВЛ типа ПБ-500.
3. Предложены новые технологии УСВЛ: модификация контура оттяжек и управляемая электропередача по нескольким цепям в противофазе для уменьшения индукционных токов в несущей конструкции ЭУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Об утверждении Методики определения нормативов потерь электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям: приказ М-ва энергетики Российской Федерации от 7 авг. 2014 г. № 506 // Министерство юстиции Российской Федерации. URL: <https://minjust.consultant.ru/documents/11644>.
2. Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям: приказ М-ва энергетики Российской Федерации от 30 дек. 2008 г. № 326. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902143004>.
3. Об опыте расчетов, анализа и нормирования потерь электроэнергии в электрических сетях России и Казахстана / В. Э. Воротницкий, М. А. Калинкина, А. С. Садовская [и др.] // Электрические станции. 2019. № 11. С. 31–43.
4. Овсянников, А. Г. Индукционные потери энергии в опорах воздушной линии электропередачи / А. Г. Овсянников, Р. А. Нечитаев // Научный вестник НГТУ. Т. 63. 2016. № 2. С. 129–140. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2016-2-129-140>.

5. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non-Sinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions: IEEE 1459–2000. IEEE, 2010. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2000.93398>.
6. Повышение качества функционирования линий электропередачи / Г. А. Данилов, Ю. М. Денчик, М. Н. Иванов, Г. В. Ситников; под ред. В. П. Горелова, В. Г. Сальникова. 3-е изд. М.: Берлин: Директ-Медиа, 2019. 558 с.
7. Additional Energy Losses From Asymmetric and Non-Sinusoidal Current in an Electrical Facility and Methods of Their Reduction / E. V. Tarasov, L. L. Bulyga, V. Ya. Ushakov, N. N. Kharlov // МАТЕС Web of Conferences. 2015. Vol. 37. P. 1057. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20153701057>.
8. Поспелов, Г. Е. Применение управляемых гибких линий электропередачи в электрических сетях энергосистем // Г. Е. Поспелов, Т. Г. Поспелова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2010. № 5. С. 5–9.
9. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: в 2 т. / Л. А. Бессонов. М.: Юрайт, 2020. Т. 1: Электрические цепи. 363 с.
10. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: в 2 т. / Л. А. Бессонов. М.: Юрайт, 2020. Т. 2: Электромагнитное поле.
11. Горшков, А. В. Эмпирический метод определения максимального значения наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной воздушной линии электропередачи / А. В. Горшков // Электричество. 2019. № 11. С. 23–32. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2019-11-23-32>.
12. Котова, Е. Н. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учеб.-метод. пособие / Е. Н. Котова, Т. Ю. Паниковская. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2014. 216 с.
13. Carson, J. R. Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return / J. R. Carson // The Bell System Technical Journal. 1926. Т. 5, No 4. С. 539–554. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1926.tb00122.x>.
14. Кухлинг, Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг; пер. с нем. 2-е изд. М.: Мир, 1985. 520 с.
15. Аполлонский, С. М. Дифференциальные уравнения математической физики в электротехнике / С. М. Аполлонский. СПб.: Питер, 2012. 352 с.
16. Компенсация искажений напряжения в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой / Д. А. Шандрыгин, В. П. Довгун, Д. Э. Егоров [и др.] // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12, № 4 (48). С. 38–52.
17. Закарюкин, В. П. Моделирование пофазно экранированных токопроводов / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 5–6. С. 120–126. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2015-0-5-6-120-126>.
18. Миткевич, В. Ф. Магнетизм и электричество / В. Ф. Миткевич. СПб.: Изд. А. С. Суворина, 1912. 258 с.
19. Нечитаев, Р. А. Анализ индукционных потерь энергии в опорах воздушной ЛЭП 500 кВ / Р. А. Нечитаев // Научный вестник НГТУ. 2017. Т. 68, № 3. С. 158–171. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2017-3-158-171>.
20. Нечитаев, Р. А. Модификация несущих конструкций воздушных линий электропередачи с целью минимизации потерь электроэнергии / Р. А. Нечитаев, А. С. Трофимов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12. № 4 (48). С. 135–147.
21. Патент RU 79310 U1, МПК E04H 12/08, E04H 12/10. Опора воздушной линии электропередачи: 2008124902/22: заявлено 20.06.2008: опубл. 27.12.2008 / В. П. Дикой, А. Л. Ивановский, Н. М. Коробков, Р. А. Нечитаев, А. Г. Овсянников; заявитель и патентообладатель ОАО «НТЦ Электроэнергетики». URL: <https://patents.google.com/patent/RU79310U1/ru>.
22. Компактные управляемые линии электропередачи / Ю. Г. Шакарян, В. М. Постолатий, Л. В. Тимашова, С. Н. Карева // Энергия единой сети. 2012. № 3. С. 24–29.
23. Nechitaev, R. A. Verification Modeling of Magnetic Field Influence on Power Transmission Line Losses / R. A. Nechitaev, N. L. Novikov, L. I. Tolstobrova // 2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). IEEE, 2021. P. 166–170. <https://doi.org/10.1109/APEIE52976.2021.9647530>.

24. Анализ электромагнитных и тепловых процессов асинхронного двигателя с помощью 3D-моделирования / А. Н. Пехота, В. Н. Галушко, Б. М. Хрусталеv, Д. В. Мирош // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 2. С. 125–136. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-125-136>.
25. Секацкий, Д. А. Расчет и анализ удельных потерь активной мощности на коронирование в воздушных линиях электропередачи с учетом климатических данных / Д. А. Секацкий, Н. А. Попкова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 1. С. 16–32. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-16-32>.
26. Nechitaev, R. New Approach to Evaluate the Energy Efficiency of Overhead Power Transmission Lines: Results of Theoretical and Experimental Research / R. Nechitaev, A. Khalyasmaa // IEEE Industry Applications Magazine. 2023. Т. 29. No 3. С. 67–74. <https://doi.org/10.1109/MIAS.2022.3214022>.

Поступила 19.11.2024 Подписана в печать 21.01.2025 Опубликовано онлайн 31.03.2025

REFERENCES

1. On Approval of the Methodology for Determining the Standards of Losses of Electric Energy during its Transmission through Electric Networks: Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No 506 of August 7, 2014. *Ministry of Justice of the Russian Federation*. Available at: <https://minjust.consultant.ru/documents/11644> (in Russian).
2. On the Organization of Work in the Ministry of Energy of the Russian Federation to Approve Standards for Technological Losses of Electricity during its Transmission through Electric Networks: Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No 326 of December 30, 2008. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/902143004> (in Russian).
3. Vorotnitskii V. E., Kalinkina M. A., Sadovskaya A. S., Novikova M. A., Tsoi D. A. (2019) On Experience of Calculating, Analyzing and Standardizing Electricity Losses in Electrical Networks of Russia and Kazakhstan. *Elektricheskie Stantsii = Electrical Stations*, (11), 31–43 (in Russian).
4. Ovsyannikov A. G., Nechitaev R. A. (2016) Induction Power Losses in Overhead Transmission Line Towers. *Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 63 (2), 129–140. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2016-2-129-140> (in Russian).
5. IEEE 1459–2000. *IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non-Sinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*. IEEE, 2010. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2000.93398>.
6. Danilov G. A., Denchik Yu. M., Ivanov M. N., Sitnikov G. V. (2019) *Improving the Quality of Functioning of Power Transmission Lines*. 2nd ed., Moscow-Berlin: Direct-Media. 558 (in Russian).
7. Tarasov E. V., Bulyga L. L., Ushakov V. Ya., Kharlov N. N. (2015) Additional Energy Losses from Asymmetric and Non-Sinusoidal Current in an Electrical Facility and Methods of their Reduction. *MATEC Web of Conferences*, 37, 01057. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20153701057>.
8. Pospelov G. E., Pospelova T. G. (2010) Application of Controlled Flexible Electric Power Lines in Power System Networks. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 5–9. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2010-0-5-126-129>.
9. Bessonov L. A. (2020) *Electrical Engineering Theoretical Fundamentals. Vol.1. Electrical Circuit*, Moscow, Yurait Publ. 239 (in Russian).
10. Bessonov L. A. (2020) *Electrical Engineering Theoretical Fundamentals. Vol. 2. Electromagnetic Field*. Moscow, Yurait Publ. 389 (in Russian).
11. Gorshkov A. V. (2019) An Empirical Method for Determining the Maximal Induced Voltage Value at the Considered Point of a Disconnected Overhead Power Line. *Elektrichestvo*, (11), 23–32. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2019-11-23-32> (in Russian).

12. Kotova E. N., Panikovskaya T. Yu. (2014) *Electromagnetic Transients in Electrical Systems*. Yekaterinburg, Ural Federal University Publ. 216 (in Russian).
13. Carson J. R. (1926) Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return. *Bell System Technical Journal*, 5 (4), 539–554. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1926.tb00122.x>.
14. Kuhlning H (1980) *Physik*. Leipzig, Veb Fachbuchverlag.
15. Apollonsky S. M. (2012) *Differential Equations of Mathematical Physics in Electrical Engineering*. St. Petersburg, Peter Publ. 352 (in Russian).
16. Shandrygin D. A., Dovgun V. P., Egorov D. E., Solopko I. V., Shishkin Z. A. (2020) Compensation of the Voltage Distortion in Electric Power Systems with Traction Load. *Kazan State Power Engineering University Bulletin*, 12 (4), 38–52 (in Russian).
17. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. (2015) Modelling of Screened Current Distributors. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, (5–6), 120–126. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2015-0-5-6-120-126> (in Russian).
18. Mitkevich V. F. (1912) *Magnetism and Electricity*. St. Petersburg, Publishing House of A. S. Suvorin. 258 (in Russian).
19. Nechitaev R. A. (2017) Analysis of Induction Power Losses in 500 kV Overhead Transmission Line Towers. *Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 68 (3), 158–171. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2017-3-158-171> (in Russian).
20. Nechitaev R. A., Trofimov A. S. (2020) Modification of a Power Transmission Line Constructive Elements to Power Losses Minimization. *Kazan State Power Engineering University Bulletin*, 12 (4), 136–148 (in Russian).
21. Dikoi V. P., Ivanovskii A. L., Korobkov N. M., Nechitaev R. A., Ovsyannikov A. G. (2008) *Overhead Transmission Line Tower*. RF Patent No 79310. Available at: <https://patents.google.com/patent/RU79310U1/ru> (in Russian).
22. Shakaryan Yu. G., Postolatii V. M., Timashova L. V., Kareva S. N. (2012) Compact Controlled Power Transmission Lines. *Energiya Edinoi Seti [Energy of Unified Grid]*, (3), 24–29 (in Russian).
23. Nechitaev R. A., Novikov N. L., Tolstobrova L. I. (2021) Verification Modeling of Magnetic Field Influence on Power Transmission Line Losses. *2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*. Novosibirsk, 166–170. <https://doi.org/10.1109/APEIE52976.2021.9647530>.
24. Pekhota A. N., Galushko V. N., Khrustalev B. M., Mirosh D. V. (2024) Analysis of Electromagnetic and Thermal Processes of an Induction Motor Using 3D Modeling. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (2), 125–136. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-125-136> (in Russian).
25. Sekatski D. A., Papkova N. A. (2024) Calculation and Analysis of Specific Losses of Active Power in Overhead Power Lines due to Corona in View of Climatic Data. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (1), 16–32. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-16-32> (in Russian).
26. Nechitaev R., Khalyasmaa A. (2023) New Approach to Evaluate the Energy Efficiency of Overhead Power Transmission Lines: Results of Theoretical and Experimental Research. *IEEE Industry Applications Magazine*, 29 (3), 67–74. <https://doi.org/10.1109/MIAS.2022.3214022>.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-128-139>

УДК 621.315.2

Определение оптимальных параметров грунтовой засыпки при прокладке силовых кабельных линий

М. Э. Высоцкий¹⁾

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

Реферат. В данной статье рассмотрена проблема технико-экономической эффективности применения материалов с повышенной теплопроводностью при засыпке траншеи силовых кабельных линий. Удельное тепловое сопротивление грунта существенно влияет на допустимые токи кабелей и, как следствие, на выбор их сечения. При высыхании грунта или его изначально высоком тепловом сопротивлении пропускная способность проводников снижается, что зачастую вынуждает использовать кабели большего сечения для обеспечения требуемого тока нагрузки. Одним из способов улучшения условий охлаждения является применение специальной, более дорогой по сравнению с грунтовой, засыпки с пониженными значениями теплового сопротивления. Тогда встает вопрос о технико-экономической целесообразности такого решения, поскольку более дорогой материал может не оправдать себя в ряде случаев. Предложена методика оптимизации, основанная на вычислении приведенных затрат, учитывающих стоимость кабеля, строительство линий и эксплуатационные расходы. Разработанная модель учитывает влияние как нормального, так и послеаварийного режимов работы. Показано, что повышение пропускной способности за счет специальной засыпки может позволить снизить сечение кабеля на одну ступень и, таким образом, компенсировать затраты на более дорогой материал. В противном случае применение специальных засыпок становится нецелесообразным. Для решения оптимизационной задачи использован генетический алгоритм, реализованный в среде MS Excel. Приведены результаты расчетных примеров, показывающих, что предлагаемая методика и алгоритм могут использоваться для различных напряжений и условий прокладки, позволяя проектировщику выбрать эффективные параметры конструкции кабельной линии.

Ключевые слова: силовой кабель, пропускная способность, удельное тепловое сопротивление засыпки, технико-экономическая оптимизация, генетический алгоритм

Для цитирования: Высоцкий, М. Э. Определение оптимальных параметров грунтовой засыпки при прокладке силовых кабельных линий / М. Э. Высоцкий // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 2. С. 128–139. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-128-139>

Determination of Optimal Parameters of the Ground Filling During the Laying of Power Cable Lines

M. E. Vysotski¹⁾

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

Abstract. The present article discusses the problem of the technical and economic efficiency of using materials with increased thermal conductivity when filling trenches of power cable lines.

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

The specific thermal resistance of the soil significantly affects the permissible cable currents and, as a result, the choice of their cross-section. When the soil dries out or it is initially of high thermal resistance, the carrying capacity of the conductors decreases, which often forces the use of cables with a larger cross-section to provide the required load current. One of the ways to improve cooling conditions is to use a special backfill with lower thermal resistance values, which is more expensive than the ground one. This raises the question of the feasibility of such a solution, since more expensive materials may not pay off in some cases. An optimization technique is proposed based on the calculation of reduced costs, taking into account the cost of cable, line construction and operating costs. The model that has been developed takes into account the influence of both normal and post-emergency operation modes. It is shown that increasing the cable current capacity due to special backfilling can reduce the cable cross-section by one step and, thus, compensate for the cost of more expensive material. Otherwise, the use of special backfills becomes impractical. To solve the optimization problem, a genetic algorithm implemented in the MS Excel environment was used. The results of calculation examples are presented, showing that the proposed methodology and algorithm can be used for various voltage and laying conditions, allowing the designer to select effective parameters of the cable line design.

Keywords: силовой кабель, пропускная способность, удельное тепловое сопротивление засыпки, технико-экономическая оптимизация, генетический алгоритм

For citation: Vysotski M. E. (2025) Determination of Optimal Parameters of the Ground Filling During the Laying of Power Cable Lines. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (2), 128–139. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-128-139> (in Russian)

Введение

Удельное тепловое сопротивление грунта оказывает существенное влияние на длительно допустимые токи жил силовых кабелей, прокладываемых в грунте [1–7]. На удельное тепловое сопротивление грунта существенно влияют его тип и влажность. Высыхание грунта вокруг кабеля под действием тепловыделения может приводить к снижению пропускной способности кабеля. Удельное тепловое сопротивление песка во влажном состоянии может составлять порядка 0,8–1,2 К·м/Вт, а в сухом состоянии составляет 2–3 К·м/Вт. Поэтому представляется целесообразным использовать для засыпки траншеи кабельной линии материалы с улучшенными тепловыми характеристиками.

Существующие исследования по использованию материалов для обратной засыпки траншеи силовых кабелей можно разделить на группы: работы, направленные на минимизацию капиталовложений [8–11], и работы, ориентированные на минимизацию суммарных затрат за цикл эксплуатации [12, 13]. При этом ток жилы кабеля может приводиться к заданной величине [8–10] или поддерживаться не выше допустимого тока по нагреву [12, 13]. Однако в указанных работах не дается однозначного ответа на вопрос об экономической целесообразности применения материалов для засыпки с повышенной теплопроводностью.

В данной статье предлагается методика оптимизации конфигурации кабельной линии для минимизации приведенных затрат при обеспечении требуемой пропускной способности. Рассматривается случай, когда минимизируются приведенные затраты при условии удовлетворения требований по предельно допустимому нагреву кабельной линии в нормальном и по-

слеаварийном режимах. Определяются условия экономической целесообразности применения засыпок с повышенной теплопроводностью. Описывается реализация генетического алгоритма оптимизации, встроенного в среде MS Excel. В отличие от предыдущих исследований, в которых использование специальных засыпок с повышенной теплопроводностью представляется само собой разумеющимся, данная методика позволяет количественно оценить технико-экономические показатели кабельной линии как с обычной, так и с засыпкой с повышенной теплопроводностью и обоснованно выбрать наилучший вариант.

Приведенные затраты на сооружение силовой кабельной линии

Сечения жил кабелей должны выбираться прежде всего исходя из экономических соображений. Экономичным считается решение, соответствующее минимуму приведенных затрат. Наряду с требованием экономичности, сечения кабелей должны удовлетворять ряду технических ограничений [14]. По экономическим критериям дополнительные капиталовложения в виде засыпки с повышенной теплопроводностью могут быть оправданы только при условии, что из-за этих дополнительных капиталовложений не увеличатся приведенные затраты:

$$Z = (E + p_a)K + 3I_p^2 R \tau \beta \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где K – стоимость линии, руб./км; E – нижняя граница эффективности капиталовложений, принимаемая не ниже ставки за предоставление кредита или за хранение средств в банке [15]; p_a – коэффициент отчислений на амортизацию, $p_a = 0,033$; I_p – расчетный ток линии, А; $R = R'(1 + y_s + y_p)(1 + \lambda_1 + \lambda_2)$ – эквивалентное электрическое сопротивление кабеля [16], Ом/км; τ – эквивалентное время максимальных потерь; β – тариф на электроэнергию в электрической сети, руб./(кВт·ч).

Капиталовложения на сооружение кабельной линии могут быть представлены в виде [17]

$$K = C_k + C_n,$$

где C_k – стоимость кабеля и муфт, руб./км; C_n – стоимость сооружения кабельной линии, руб./км.

Стоимость сооружения кабельной линии на один километр в траншее

$$C_n = (h - x)yl \cdot C_1 + xyl \cdot C_2 + C_3 + C_4 + \\ + xyl \cdot C_5 + (h - x)yl \cdot C_6 + xyl \cdot C_7 + C_8,$$

где l – длина траншеи (принятая 1 км), м; C_1 – стоимость разработки грунта в отвал экскаваторами, руб./м³; C_2 – то же разработки грунта с погрузкой на автомобили-самосвалы экскаваторами, руб./м³; C_3 – то же устройство постели для кабеля в траншее, руб./км; C_4 – то же укладки кабеля в готовую

траншею с массой кабеля на 1 м до 1, 3, 6 кг, руб./км; C_5 – то же материала засыпки, руб./м³; C_6 – то же засыпки траншеи бульдозерами и работы на отвале, руб./м³; C_7 – то же вывоза грунта на полигон, руб./м³; C_8 – то же монтажа термоусаживаемых муфт кабелей напряжением 10 кВ, руб./шт.

В настоящее время для засыпки кабельных траншей применяются различные теплопроводные материалы [4, 8]:

– песчано-цементная смесь в пропорции 1 к 10 или 1 к 12 с удельным тепловым сопротивлением в сухом состоянии $\rho_c = 1,0 \text{ К} \cdot \text{м/Вт}$ и стоимостью около 20 евро/м³;

– FTB (Fluidized Thermal Backfill) – смесь песка, воды, цемента и золы с $\rho_c = 0,6 \text{ К} \cdot \text{м/Вт}$ и стоимостью 125 евро/м³;

– POWERCRETE – специальная смесь компании Heidelberg Cement Group [18] с $\rho_c = 0,3 \text{ К} \cdot \text{м/Вт}$ и стоимостью 250 евро/м³.

Цена на песок или песчано-гравийную смесь в Республике Беларусь составляет около 8 евро/м³.

Пропускная способность силовой кабельной линии

Идеальным с точки зрения экономии будет случай, когда никакие технические критерии не завысили площадь поперечного сечения, определенную по экономическому критерию. Но для электрической сети при выборе сечения проводников это условие может не соблюдаться.

Сечение жил должно удовлетворять требованиям предельного длительно допустимого нагрева:

– в нормальном режиме допустимый ток должен удовлетворять условию

$$I_{\text{доп}} \geq I_p, \quad (2)$$

где $I_{\text{доп}}$ – длительно допустимый ток токопроводящей жилы кабеля; I_p – расчетный ток линии нормального режима;

– в послеаварийном режиме должно удовлетворяться условие

$$I_{\text{доп}} \geq I_{p.a} = \frac{I_p \cdot k_{a.n}}{k_{\text{пер}}}, \quad (3)$$

где $I_{p.a}$ – расчетный ток линии аварийного режима; $k_{\text{пер}}$ – допустимый коэффициент перегрузки для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена для прокладки: в земле – 17 %, в воздухе – 20 %, при этом не более 8 ч в сутки для кабелей напряжением 10 кВ и не более 1000 ч за срок службы [19]; $k_{a.n}$ – коэффициент увеличения расчетной нагрузки в аварийном режиме, зависящий от конфигурации электрической сети.

Для оценки влияния удельного теплового сопротивления грунта и засыпки на допустимые токи кабелей использована методика [20, 21]. Длительно допустимый ток определяется по формуле

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5T_1 + nT_3 + T_4]}{RT_1 + R(1 + \lambda_1)T_2 + R(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{0,5}, \quad (4)$$

где $\Delta\theta$ – превышение температуры жилы кабеля над средней температурой окружающей среды, °С; W_d – диэлектрические потери в изоляции, Вт/м; n – количество жил в кабеле; R – сопротивление жилы кабеля переменному току на единицу длины кабеля при максимальной рабочей температуре, Ом/м; λ_1, λ_2 – отношение потерь мощности в экране и броне соответственно к общим потерям в жилах кабеля; T_1, T_2, T_3, T_4 – тепловое сопротивление изоляции, подушки, оболочки, окружающей среды, К·м/Вт.

Значение T_4 вычисляется:

– для трех однофазных кабелей, расположенных треугольником вплотную, имеющих экран из медных проволок, когда удельное тепловое сопротивление засыпки и окружающего грунта одинаковое:

$$T_4 = \frac{\rho_e}{2\pi} [\ln(2u) + 2\ln(u)]; \quad (5)$$

– для трехжильного кабеля, когда удельное тепловое сопротивление засыпки и окружающего грунта одинаковое:

$$T_4 = \frac{\rho_e}{2\pi} \ln(2u); \quad (6)$$

– при различных удельных тепловых сопротивлениях грунта и засыпки соответственно:

$$T_4 = \frac{\rho_c}{2\pi} [\ln(2u) + 2\ln(u)] + \frac{N_c}{2\pi} (\rho_e - \rho_c) \cdot G_b; \quad (7)$$

$$T_4 = \frac{\rho_c}{2\pi} \ln(2u) + \frac{N_c}{2\pi} (\rho_e - \rho_c) \cdot G_b. \quad (8)$$

В (5) и (6) u вычисляется по формуле

$$u = \frac{2L}{d}; \quad (9)$$

в (7) и (8) – по формуле

$$u = \frac{L_G}{r_b}; \quad (10)$$

Эквивалентный радиус засыпки r_b и геометрический фактор G_b вычисляются по формулам:

$$r_b = \exp \left[\frac{1}{2} \frac{x}{y} \left(\frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \ln \left(1 + \frac{x^2}{y^2} \right) + \ln \frac{x}{2} \right]; \quad (11)$$

$$G_b = \ln \left(\frac{2L_g}{r_b} \right), \quad (12)$$

где ρ_e – удельное тепловое сопротивление грунта К·м/Вт; ρ_c – удельное тепловое сопротивление засыпки, К·м/Вт; L – расстояние от поверхности земли до оси кабеля, мм; L_g – глубина прокладки до центра засыпки, мм; N_c – число нагруженных кабелей; x – короткая сторона засыпки, мм; y – длинная сторона засыпки, мм.

Формула (11) применима только при соотношении $y/x \leq 3$. В [22] представлены значения геометрического фактора для иных геометрических соотношений засыпки.

Минимум приведенных затрат с учетом ограничения по пропускной способности

Целесообразность применения специальной засыпки определяется тем, влечет ли это снижение приведенных затрат по сравнению с вариантом обычной засыпки. Если за счет повышения пропускной способности кабеля удастся выбрать сечение жил на ступень меньше, чем требовалось бы без специальной засыпки, то дополнительные капиталовложения в засыпку могут быть оправданы экономией на стоимости кабеля. В противном случае более выгодным будет вариант с обычной засыпкой и кабелем большего сечения. Иначе говоря, если экономическая плотность тока для кабельной линии с обычной засыпкой была выше, чем длительно допустимая плотность тока по нагреву, то использование специальной подсыпки нецелесообразно.

Рассмотрим на примере кабельной линии напряжением 110 кВ (рис. 1) график зависимости минимума приведенных затрат от тока линии для разных сечений жил при площади поперечного сечения экрана 120 мм² и двустороннем заземлении экрана (при $E = 0,1$; $\tau = 2000$ ч; $\rho_e = 1,8$ К·м/Вт). График построен для случая, когда расчетный ток линии аварийного режима в 1,5 раза больше тока нормального режима, для песчаной засыпки и песчано-цементной засыпки с $\rho_e = 1,0$ К·м/Вт.

График имеет ступенчатый вид, поскольку для данных расчетных условий получалось, что длительно допустимая плотность тока по нагреву была ниже экономической плотности тока и соответственно требовалось повысить сечение, чтобы удовлетворить требованию по условию нагрева.

Из графика видно, что на расчетных токах до 600 А засыпка повышает приведенные затраты, а далее она может позволять уменьшать приведен-

ные затраты. Для случая, выделенного красным цветом, приведенные затраты уменьшаются на 4 %. В этой ситуации применение песчано-цементной засыпки позволило использовать сечение жил 800 мм^2 вместо 1000 мм^2 , что требовало ограничение пропускной способности.

Поскольку на технико-экономические показатели кабельной линии влияет большое количество факторов, построение подобных графиков для всех возможных вариантов не представляется рациональным. Поэтому целесообразно использовать алгоритм оптимизации, который для конкретных исходных данных позволит найти решение, обеспечивающее минимум приведенных затрат при выполнении технических ограничений.

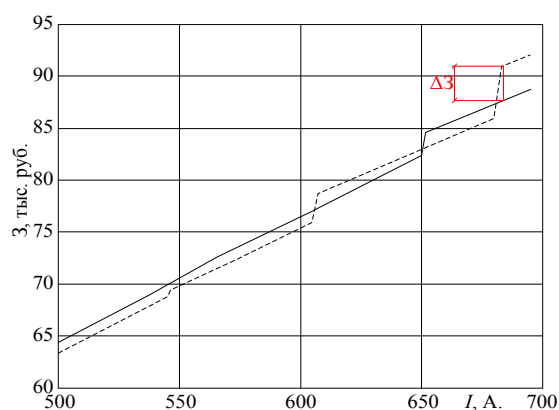


Рис. 1. Зависимость приведенных затрат для линии 110 кВ с одножильными кабелями, проложенными треугольником, с засыпкой: песчано-цементной смесью (сплошные линии); песком или песчано-гравийной смесью (штриховые линии)

Fig. 1. Dependence of the reduced costs for a 110 kV line with single-core cables laid in a triangle, filled with: sand-and-cement mixture (solid lines); sand or sand-and-gravel mixture (dashed lines)

Алгоритм оптимизации

Задачу оптимизации параметров кабельной линии можно сформулировать следующим образом: найти значения площади поперечного сечения жил, материал и геометрические размеры засыпки, обеспечивающие минимум целевой функции приведенных затрат (1) при условии выполнения ограничений по длительно допустимому току в нормальном (2) и послеаварийном режимах (3).

Данная задача характеризуется нелинейностью целевой функции, наличием дискретных переменных (стандартные сечения жил, тип засыпки и ее габариты), а также большим количеством влияющих факторов. Для ее эффективного решения целесообразно использовать методы, позволяющие находить глобальный экстремум в условиях сложного характера зависимостей, таких как генетический алгоритм [23]. Этот метод успешно применяется в задачах оптимизации электроэнергетики [24] и доступен через встроенный в Excel инструмент Solver [25, 26].

Генетический алгоритм представляет собой эвристический метод многомерной оптимизации, основанный на концепциях естественного отбора и генетики. Его суть состоит в случайной генерации множества возможных решений, оценке значения целевой функции и формировании новых решений на основе наилучших предыдущих решений. Процесс продолжается до достижения заданного числа решений или сходимости алгоритма.

Для оптимизации конфигурации кабельной линии с помощью генетического алгоритма в надстройке Solver MS Excel необходимо выполнить следующие шаги:

1. Ввести исходные данные: электрические, тепловые, геометрические и стоимостные показатели кабельной линии для всего номинального ряда сечений жил кабелей.

2. Сформировать целевую ячейку для минимизации приведенных затрат по формуле (1) и ограничений по допустимому нагреву в виде (2) и (3).

3. Задать диапазоны изменения оптимизируемых переменных: дискретного ряда стандартных сечений жил кабеля (например, {95, 120, ..., 1000} мм²); типа засыпки, также ее толщины (например, $x = 0,2-0,5$ м) и ширины (например, $y = 0,3-0,5$ м).

4. Вызвать надстройку Solver и установить ее параметры: целевая ячейка – минимизация приведенных затрат; изменяемые ячейки – площадь сечения жил, размеры засыпки и ее тепловое сопротивление; ограничения – длительно допустимые токи в нормальном и послеаварийном режимах не меньше расчетных значений; параметры эволюционного алгоритма: тип модели – Evolutionary; сходимость – 0,00001.

5. Запустить алгоритм. В ходе его работы случайным образом генерируются варианты решений, из которых отбираются лучшие по критерию минимума целевой функции при выполнении ограничений. Поиск продолжается до нахождения глобального оптимума.

6. Проанализировать полученное решение. Из отчета Solver определить оптимальные значения площади сечения жил кабеля, геометрических параметров засыпки и ее удельного теплового сопротивления, обеспечивающие минимум приведенных затрат.

Пример результатов предложенного алгоритма для трехжильного кабеля напряжением 10 кВ при следующих исходных данных: $I_p = 300$ А; $I_{p.a} = 450$ А; $E = 0,1$; $\tau = 2000$ ч; $\beta = 0,24$ руб./(кВт·ч); $\rho_e = 3,0$ К·м/Вт; $\rho_c = 1,0$ К·м/Вт. Оптимальным оказалось использование кабеля с сечением жилы 500 мм² с засыпкой из песчано-цементной смеси: $I_{доп} = 450$ А; $Z = 20335$ руб. При применении обычной подсыпки требуется использовать жилу 630 мм² с $I_{доп} = 474$ А; $Z = 20359$ руб. То есть затраты оказались практически равнозначными. Если рассматривать $\rho_e = 1,8$ К·м/Вт, то наименьшей по приведенным затратам оказывается песчаная засыпка с кабелем сечением жилы 400 мм² ($I_{доп} = 456$ А; $Z = 20230$ руб.).

Целесообразность применения специальной засыпки определяется следующими основными факторами:

– значением расчетного тока линии в нормальном и послеаварийном режимах. Если повышение пропускной способности кабеля за счет улучшения условий охлаждения позволяет выбрать сечение жил на ступень меньше по сравнению с вариантом обычной (песчаной) засыпки, то дополнительные затраты на засыпку могут быть оправданы экономией на стоимости кабеля;

– стоимостью кабельной линии и засыпки. Чем выше стоимость кабеля, тем вероятнее, что расходы на специальную засыпку оправдаются благодаря возможности применить кабель меньшего сечения;

– удельным тепловым сопротивлением грунта и засыпки. Использование специальной засыпки более целесообразно при высоких значениях теплового сопротивления грунта, когда ее применение обеспечивает существенное улучшение условий охлаждения кабеля. При хорошо проводящем теплоту грунте выигрыш в пропускной способности будет меньше и может не оправдать дополнительных капиталовложений.

Расчеты для кабельных линий напряжением 10 и 110 кВ показали, что использование более дорогих материалов с повышенной теплопроводностью часто оказывается экономически нецелесообразным, так как в большинстве случаев экономический эффект не превышал 5 %. Во многих примерах применение таких материалов попросту невыгодно.

Важным остается вопрос о выборе значения удельного теплового сопротивления грунта для конкретной кабельной линии, поскольку именно оно в значительной мере определяет пропускную способность кабеля.

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика технико-экономической оптимизации конфигурации кабельной линии, позволяющая определить условия целесообразности применения засыпок с повышенной теплопроводностью для минимизации приведенных затрат при обеспечении требуемой пропускной способности.

2. Разработан алгоритм оптимизации на основе генетического метода, реализованный в среде MS Excel. Алгоритм позволяет определять оптимальные значения сечения жил кабеля и параметров засыпки, обеспечивающие минимум приведенных затрат при выполнении ограничений по допустимому нагреву.

3. Эффективность применения засыпок с повышенной теплопроводностью значительно зависит от значения расчетного тока кабельной линии, стоимости кабеля и засыпки, удельного теплового сопротивления грунта. Расчеты для кабельных линий 10 и 110 кВ продемонстрировали, что в большинстве случаев такие материалы экономически невыгодны. При наличии положительного экономического эффекта он, как правило, не превышал 5 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Weedy, B. *Underground Transmission of Electric Power* / B. Weedy. New York : John Wiley and Sons. 1980. 232 p.
2. Бронгулеева, М. Н. Кабельные линии высокого напряжения / М. Н. Бронгулеева, С. С. Городецкий. Л.; М. : Госэнергоиздат, 1963. 512 с.
3. Anders, G. J. *Rating of Electric Power Cables in Unfavorable Thermal Environment*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2005.
4. Ocloń, P. *Renewable Energy Utilization Using Underground Energy Systems*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2021. (Lecture Notes in Energy; vol. 84). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-75228-6>.
5. Leon, F. de. Effects of Backfilling on Cable Ampacity Analyzed With the Finite Element Method / F. de Leon, G. J. Anders // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2008. Vol. 23, No 2. P. 537–543. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.917648>.
6. Gouda, O. E. Effect of the Formation of the Dry Zone Around Underground Power Cables on Their Ratings / O. E. Gouda, A. Z. El Dein, G. M. Amer // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2011. Vol. 26, No 2. P. 972–978. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2060369>.
7. Gouda, O. E. Improving Underground Power Distribution Capacity Using Artificial Backfill Materials / O. E. Gouda, A. Z. El Dein // *IET Gener. Transm. Distrib.* 2015. Vol. 9, No 15. P. 2180–2187. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0274>.
8. Multiobjective Optimization of Underground Power Cable Systems / P. Ocloń, M. Rerak, R. V. Rao [et al.] // *Energy*. 2021. Vol. 215, Part B. Art. 119089. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119089>.
9. Ocloń, P. Analysis of an Application Possibility of Geopolymer Materials as Thermal Backfill for Underground Power Cable System / P. Ocloń, P. Cisek, M. Matysiak. *Clean Techn Environ Policy*. 2021. Vol. 23. P. 869–878. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01942-8>.
10. Ocloń, P. The Effect of Soil Thermal Conductivity and Cable Ampacity on the Thermal Performance and Material Costs of Underground Transmission Line / P. Ocloń. *Energy*. 2021. Vol. 231. Art. 120803. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120803>.
11. Czapp, S. Optimization of Thermal Backfill Configurations for Desired High-Voltage Power Cables Ampacity / S. Czapp, F. Ratkowski // *Energies*. 2021. Vol. 14. Art. 1452. <https://doi.org/10.3390/en14051452>.
12. Cichy, A. Economic Optimization of an Underground Power Cable Installation / A. Cichy, B. Sakowicz, M. Kaminski // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2018. Vol. 33, No 3. P. 1124–1133. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2728702>.
13. Cichy, A. Detailed Model for Calculation of Life-Cycle Cost of Cable Ownership and Comparison with the IEC Formula / A. Cichy, B. Sakowicz, M. Kaminski // *Electric Power Systems Research*. 2018. Vol. 154. P. 463–473. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.09.009>.
14. Поспелов, Г. Е. *Электрические системы и сети: учеб.* / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин, П. В. Лычев. Минск: УП «Технопринт», 2004. 720 с.
15. Герасименко, А. А. *Электрические системы и сети: учеб. пособие для студ.* / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. Ростов-на-Дону: Феникс, 2023. 473 с.
16. Electric cables. Calculation of the Current Rating. Part 3–2: Section on Operating Conditions – Economic Optimization of Power Cable Size : IEC 60287-3-2:2012. Geneva: IEC, 2012. 42 p.
17. Высоцкий, М. Э. Выбор конструктивного устройства кабельных линий напряжением 10 кВ по критерию минимума приведенных затрат / М. Э. Высоцкий // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 6. С. 488–500. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-488-500>.
18. Heat-conducting Concrete // Heidelberg Materials. URL: <https://www.heidelbergmaterials.co.uk/en/ready-mixed-concrete/heat-conducting-concrete>.
19. Силовые кабельные линии напряжением 6–110 кВ. Нормы проектирования по прокладке кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена пероксидной сшивки: ТКП 611–2017. Минск : Мин-во энергетики Республики Беларусь, 2017. 103 с.

20. IEC 60287-1-1:2023. Electric Cables – Calculation of the Current Rating. Part 1–1: Current Rating Equations (100 % load factor) and Calculation of Losses General. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/164f72dc-b67a-496b-af43-97e28a944a7b/iec-60287-1-1-2023>.
21. Calculation of the Current Rating. Part 2–1: Thermal Resistance – Calculation of Thermal Resistance: IEC 60287-2-1:2023. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/9a2a6795-afb1-4194-97ae-9eef8d36e808/iec-60287-2-1-2023>.
22. El-Kady, M. A. Extended Values for Geometric Factor of External Thermal Resistance of Cables in Duct Banks / M. A. El-Kady, D. J. Horrocks // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1985. Vol. PAS-104, № 8. P. 1958–1962. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1985.318767>.
23. Гладков, Л. А. Генетические алгоритмы / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик; под ред. В. М. Курейчика. 2-е изд., исправ. и доп. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 368 с.
24. Оптимизация топологии сети с ВИЭ-генерацией на основе модифицированного адаптированного генетического алгоритма / А. М. Брамм, А. И. Хальясмаа, С. А. Ерошенко [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 4. С. 341–354. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-341-354>.
25. Trautmann, N. On an application of Microsoft Excel's Evolutionary Solver to the Resource-constrained Project Scheduling Problem RCPSP / N. Trautmann, M. Gnägi // *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Singapore, 2015. P. 646–650. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2015.7385727>.
26. Keisler, J. M. (2024). *Optimization: Excel Solver* / J. M. Keisler // *Prescriptive Analytics*. Springer Texts in Business and Economics. Springer, Cham, 2024. P. 221–246. https://doi.org/10.1007/978-3-031-59353-6_10.

Поступила 16.12.2024 Подписана в печать 17.02.2025 Опубликована онлайн 31.03.2025

REFERENCES

1. Weedy B. (1980) *Underground Transmission of Electric Power*. New York, John Wiley and Sons. 232.
2. Bronguleeva M. N., Gorodetskii S. S. (1963) *High Voltage Cable Lines*. Leningrad; Moscow, Gosenergoizdat Publ. 512 (in Russian).
3. Anders G. J. (2005) *Rating of Electric Power Cables in Unfavorable Thermal Environment*. John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA.
4. Oclon P. (2021) *Renewable Energy Utilization Using Underground Energy Systems. Lecture Notes in Energy. Vol. 84*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland. 173 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-75228-6>.
5. Leon F. de, Anders G. J. (2008) Effects of Backfilling on Cable Ampacity Analyzed with the Finite Element Method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23 (2), 537–543. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.917648>.
6. Gouda O. E., El Dein A. Z., Amer G. M. (2011) Effect of the Formation of the Dry Zone Around Underground Power Cables on Their Ratings. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26 (2), 972–978. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2060369>.
7. Gouda O. E., El Dein A. Z. (2015) Improving Underground Power Distribution Capacity Using Artificial Backfill Materials. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 9 (15), 2180–2187. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0274>.
8. Ocloń P., Rerak M., Rao R. V., Cisek P., Vallati A., Jakubek D., Rozegnał B. (2021) Multi-objective Optimization of Underground Power Cable Systems. *Energy*, 215 (part B), 119089. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119089>.
9. Ocloń P., Cisek P., Matysiak M. (2021) Analysis of an Application Possibility of Geopolymer Materials as Thermal Backfill for Underground Power Cable System. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23, 869–878. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01942-8>.
10. Ocloń P. (2021) The Effect of Soil Thermal Conductivity and Cable Ampacity on the Thermal Performance and Material Costs of Underground Transmission Line. *Energy*, 231, 120803. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120803>.

11. Czapp S., Ratkowski F. (2021) Optimization of Thermal Backfill Configurations for Desired High-Voltage Power Cables Ampacity. *Energies*, 14 (5), 1452. <https://doi.org/10.3390/en14051452>.
12. Cichy A., Sakowicz B., Kaminski M. (2018) Economic Optimization of an Underground Power Cable Installation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33 (3), 1124–1133. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2728702>.
13. Cichy A., Sakowicz B., Kaminski M. (2018) Detailed Model for Calculation of Life-Cycle Cost of Cable Ownership and Comparison with the IEC formula. *Electric Power Systems Research*, 154, 463–473. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.09.009>.
14. Pospelov G. E., Fedin V. T., Lychev P. V. (2004) *Electrical Systems and Networks*. Minsk, Technoprint Publ. 720 (in Russian).
15. Gerasimenko A. A., Fedin V. T. (2023) *Electrical Systems and Networks*. Rostov-on-Don, Feniks Publ. 473 p. (in Russian).
16. IEC 60287-3-2:2012. *Calculation of the current rating. Part 3–2: Section on Operating Conditions – Economic Optimization of Power Cable Size*. Geneva, IEC, 2012. 42 p.
17. Vysotski M. E. (2024) The Choice of a Construction Arrangement for Cable Lines with a Voltage of 10 kV According to the Criterion of the Minimum Expected Cost. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (6), 488–500. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-488-500> (in Russian).
18. Heat-conducting Concrete. *Heidelberg Materials*. Available at: <https://www.heidelbergmaterials.co.uk/en/ready-mixed-concrete/heat-conducting-concrete>.
19. TKP 611-2017: *6-110 kV Power Cable Lines. Design Standards for Laying Cables Insulated with Cross-Linked Polyethylene Peroxide Crosslinking*. Minsk, Ministry of Energy of the Republic of Belarus, 2017. 103 p. (in Russian).
20. IEC 60287-1-1:2023. *Electric Cables – Calculation of the Current Rating. Part 1–1: Current Rating Equations (100 % Load Factor) and Calculation of Losses – General*. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/164f72dc-b67a-496b-af43-97e28a944a7b/iec-60287-1-1-2023>.
21. IEC 60287-2-1:2023. *Electric Cables – Calculation of the Current Rating. Part 2–1: Thermal Resistance – Calculation of Thermal Resistance*. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/9a2a6795-afb1-4194-97ae-9eef8d36e808/iec-60287-2-1-2023>.
22. El-Kady M. A., Horrocks D. J. (1985) Extended Values for Geometric Factor of External Thermal Resistance of Cables in Duct Banks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104 (8), 1958–1962. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1985.318767>.
23. Gladkov L. A., Kureichik V. V., Kureichik V. M. (2010) *Genetic Algorithms*. 2nd ed. Moscow, FIZMATLIT Publ. 368 (in Russian).
24. Bramm A. M., Khalyasmaa A. I., Eroshenko S. A., Matrenin P. V., Papkova N. A., Sekatski D. A. (2022) Topology Optimization of the Network with Renewable Energy Sources Generation Based on a Modified Adapted Genetic Algorithm. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (4), 341–354. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-341-354> (in Russian).
25. Trautmann N., Gnägi M. (2015) On an Application of Microsoft Excel's Evolutionary Solver to the Resource-Constrained Project Scheduling Problem RCPSp, *2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Singapore, 646–650. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2015.7385727>.
26. Keisler J. M. (2024) Optimization: Excel Solver. Prescriptive Analytics. *Springer Texts in Business and Economics*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-59353-6_10.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-140-153>

УДК 536.24

Влияние технологических факторов процесса изготовления биметаллической ребристой трубы на интенсивность теплопередачи аппаратов воздушного охлаждения

А. Б. Сухоцкий¹⁾, В. Б. Кунтыш¹⁾

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

Реферат. В статье представлено экспериментальное исследование зависимости интенсивности теплопередачи шестирядного шахматного пучка из биметаллических ребристых труб от технологических факторов изготовления ребристой алюминиевой оболочки холодной накаткой на несущей трубе. Пучок устанавливался в аэродинамической трубе и омывался принудительным перпендикулярным потоком воздуха. Для измерения коэффициента теплоотдачи в центральной части третьего и пятого поперечных рядов пучка устанавливалась электродная труба-калориметр кипящего типа (метод локального теплового моделирования). Экспериментальные данные представлялись в виде зависимостей чисел Нуссельта и Эйлера от чисел Рейнольдса. Также экспериментально исследовались термическое контактное сопротивление (обратная величина теплопроводности при тепловом контакте) и протяженность воздушного зазора в зоне контакта между алюминиевой оболочкой и несущей трубой биметаллической ребристой трубы. Экспериментальными исследованиями установлено, что смазочно-охлаждающая жидкость на поверхности накатных алюминиевых ребер биметаллических ребристых труб не ухудшает интенсивность теплообмена и аэродинамическое сопротивление пучков теплообменной секции аппаратов воздушного охлаждения. Наличие дополнительных обжимных дисков на станах холодной прокатки ребристых труб увеличивает теплопередачу на 8–13 %. При этом усилии выпрессовки не может являться основным критерием оценки качества присоединения оболочки биметаллических ребренных труб, как это принято на предприятиях отрасли в настоящее время. Величина относительной протяженности воздушного зазора более объективно характеризует состояние контакта несущей трубы и ребренной оболочки, но использование его определяющим параметром при экспресс-контроле качества изготовления труб невозможно из-за трудоемкости его вычисления. В контактной зоне биметаллических ребристых труб любая среда с коэффициентом теплопроводности большим, чем у воздуха, снижает термическое контактное сопротивление и является интенсифицирующим фактором теплопередачи. В соответствии с тепловой характеристикой биметаллических ребристых труб аппаратов воздушного охлаждения нецелесообразно удалять консервационную смазку или другое масло с наружной поверхности несущих труб.

Ключевые слова: термическое контактное сопротивление, теплоотдача и аэродинамическое сопротивление шахматных пучков, поперечно-винтовая прокатка алюминиевой оболочки, труба-калориметр

Для цитирования: Сухоцкий, А. Б. Влияние технологических факторов процесса изготовления биметаллической ребристой трубы на интенсивность теплопередачи аппаратов воздушного охлаждения / А. Б. Сухоцкий, В. Б. Кунтыш // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 2. С. 140–153. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-140-153>

Адрес для переписки

Сухоцкий Альберт Борисович
Белорусский государственный технологический университет
ул. Свердлова, 13а,
220006, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 327-87-30
alk2905@mail.ru

Address for correspondence

Sukhotski Al'bert B.
Belarusian State Technological University
13a, Sverdlova str.,
220006, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 327-87-30
alk2905@mail.ru

The Influence of Technological Factors of the Bimetallic Ribbed Tube Manufacturing Process on the Heat Transfer Rate of Air-Cooling Units

A. B. Sukhotski¹⁾, V. B. Kuntysh¹⁾

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

Abstract. The article presents an experimental study of the dependence of the heat transfer rate of a six-row staggered bundle made of bimetallic ribbed tubes on the technological factors of manufacturing a cold-rolled ribbed aluminum shell on a supporting tube. The bundle was installed in a wind tunnel and washed by a forced perpendicular air flow. To measure heat transfer, a local thermal modeling method was applied using an electrode calorimeter tube of a fluidized type installed in the middle of the third and fifth transverse rows of the bundle. The experimental data were presented in the form of dependences of the Nusselt and Euler numbers on the Reynolds numbers. Also, thermal contact resistance (the inverse value of thermal conductivity during thermal contact) and the length of the air gap in the contact zone between the aluminum shell and the bearing tube of a bimetallic ribbed tube were experimentally studied. Due to experimental studies, it was found that the lubricating and cooling liquid on the surface of rolled aluminum ribs of bimetallic ribbed tubes does not worsen the rate of heat transfer and the aerodynamic resistance of the bundles of the heat exchange section of air-cooling units. The presence of additional crimping discs in cold rolling mills for ribbed tubes increases heat transfer by 8–13 %. At the same time, the extrusion force cannot be accepted as the main criterion for assessing the quality of connecting the shell of bimetallic ribbed tubes, as is customary in the industry at present. The value of the relative length of the air gap more objectively characterizes the state of contact between the main tube and the ribbed shell, but its use as a determining parameter in express quality control of bimetallic tubes is impossible due to the laboriousness of its calculation. In the contact zone of bimetallic ribbed tubes, any medium with a thermal conductivity coefficient greater than that of air reduces the thermal contact resistance and is an intensifying factor of heat transfer. Due to the thermal characteristics of bimetallic ribbed tubes of air-cooling units, it is impractical to remove presservative grease or other oil from the outer surface of the bearing tubes.

Key words: thermal contact resistance, heat transfer and aerodynamic resistance of staggered bundles, cross-helical rolling of aluminum shell, calorimeter tube

For citation: Sukhotski A. B., Kuntysh V. B. (2025) The Influence of Technological Factors of the Bimetallic Ribbed Tube Manufacturing Process on the Heat Transfer Rate of Air-Cooling Units. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (2), 140–153. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-140-153> (in Russian)

Введение

Биметаллические ребристые трубы (БРТ) обладают рядом преимуществ, включая высокую прочность, малый вес и устойчивость к коррозии. Они являются теплопередающим элементом аппаратов воздушного охлаждения (АВО), широко используемых в электро- и теплоэнергетике, химической, газовой, нефтеперерабатывающей промышленности, крупных холодильных установках [1]. Ежегодно в странах СНГ для выпуска новых, ремонта и модернизации эксплуатируемых АВО изготавливается около 1,1–1,5 млн погонных метров БРТ.

В настоящее время достаточно полно исследованы [1–8] средняя теплоотдача и аэродинамическое сопротивление шахматных пучков БРТ АВО

и получены уравнения подобия для проектных тепловых расчетов. Однако в них не учтено влияние промышленных технологических факторов изготовления БРТ на процессы теплообмена. В результате этого в процессе эксплуатации АВО возможно снижение действительного от проектного теплового потока АВО.

Конструкция БРТ состоит из круглой несущей трубы и механически соединенной с ней оболочки со спиральными ребрами, которые методом холодной накатки (пластической деформации) вытягиваются из гладкой цилиндрической трубы-заготовки, предварительно насаженной на несущую цилиндрическую трубу [9]. Несущая труба из стали или цветных металлов обеспечивает прочность и долговечность БРТ, а ребристая оболочка из алюминия или другого теплопроводного пластичного металла – высокую теплоотдачу и коррозионную стойкость. Накатка ребер производится на стане тремя расположенными под углом 120° шпинделями с комплектом накатных дисков. Для охлаждения заготовок и повышения эффективности накатки применяется смазочно-охлаждаемая жидкость (СОЖ), которая частично остается на поверхности ребер. При накатке оребрения должно обеспечиваться плотное обжатие оболочки вокруг несущей трубы. Однако в зоне механического соединения несущей трубы и ребристой оболочки возможно образование зазоров, заполненных воздухом или консервационной смазкой заготовок.

Цель статьи – экспериментальное изучение влияния указанных технологических факторов на интенсивность теплопередачи БРТ АВО.

Основная часть

В процессе накатки на трехвалковых станах холодной прокатки ребристых труб (ХПРТ) для снижения износа оборудования и улучшения качества обработки оболочки БРТ рекомендуется смачивание зон воздействия накатных дисков СОЖ в виде 5%-го водного раствора эмульсора. При этом состав эмульсора включает 60 % пластичной антифрикционной смазки СТП-1 (триэтиленгликолевый эфир синтетической жирной кислоты с добавкой 20%-го триэтиленгликолевого эфира олеиновой кислоты), 20 % стерокса-6 (смесь полиоксиэтиленгликолевых эфиров стеариновой кислоты) и 20 % жиромола.

После прокатки остаточное количество СОЖ на поверхности алюминиевой ребристой оболочки, как правило, не превышает $0,3 \text{ г/м}^2$. Удаление этих остатков сопряжено с технологическими и экологическими проблемами для предприятий – производителей БРТ.

В качестве объекта исследования влияния остатков СОЖ на теплоотдачу и аэродинамическое сопротивление воздухоохлаждаемого пучка были выбраны стандартизированные промышленные БРТ без очистки после накатки с двухзаходными спиральными ребрами из алюминия АД1 следующих параметров: $d \times d_0 \times d_n \times h \times s \times \Delta = 56 \times 28 \times 25 \times 14 \times 3 \times 0,75$ мм, коэффициент оребрения $\phi = 15,25$. Здесь обозначения параметров соответствуют:

d – наружный диаметр ребра; $d_0 = d - 2h$ – диаметр основания ребра; d_n – внутренний диаметр ребристой оболочки (наружный диаметр несущей стальной трубы); h, s, Δ – высота, шаг и средняя толщина ребра. Трубы в шахматном шестирядном пучке размещались по вершинам равностороннего треугольника с поперечными $S_1 = 58$ мм и продольными $S_2 = 50,2$ мм шагами.

Пучок продувался принудительным поперечным потоком воздуха в разомкнутой аэродинамической трубе с квадратным поперечным сечением канала 400×400 мм [8]. Воздух всасывался центробежным вентилятором через конфузур в стабилизирующий участок, обеспечивающий формирование равномерного поля скорости на входе в трубный пучок. Потери давления на пучке определяли датчиками по разности статического давления воздуха перед пучком и за ним. Для определения коэффициента теплоотдачи был применен метод локального теплового моделирования, который заключался в размещении в центральной части третьего и пятого поперечных рядов пучка электродной трубы-калориметра кипящего типа. Во время проведения опыта температура кипения водного раствора электролита внутри трубы-калориметра соответствовала атмосферному давлению. Температуру основания оребренной оболочки трубы-калориметра находили по показаниям двух термодпар, расположенных с обоих концов оребренной части трубы на угловом расстоянии 95° от лобовой точки трубы, в которых местная и средняя температуры стенки совпадали.

По завершении опытов с загрязненными трубами пучка они были подвергнуты очистке от СОЖ слабым раствором каустической соды до металлического алюминиевого блеска и повторно испытаны по той же методике с параметрами предыдущего пучка.

Результаты экспериментальных исследований обрабатывали в безразмерном виде – в числах Нуссельта $Nu_i = \alpha_i d_0 / \lambda$; Рейнольдса $Re = w d_0 / \nu$; Эйлера $Eu = \Delta p / (\rho w^2)$, где α_i – коэффициент теплоотдачи, вычисленный по площади поверхности оребрения трубы, i -го поперечного ряда пучка, Вт/(м²·К); w – скорость воздуха в самом узком (сжатом) поперечном сечении пучка, м/с; Δp – потери статического давления на пучке при движении потока воздуха, Па; ρ, λ, ν – плотность, кг/м³, коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), и кинематической вязкости, м²/с, воздуха. Теплофизические параметры воздуха принимали по его средней температуре в пучке.

Результаты экспериментов по теплоотдаче 3-го и 5-го рядов и аэродинамическому сопротивлению пучка представлены на рис. 1 (черными точками при наличии СОЖ на оребрении и светлыми – для очищенной поверхности). Как видно из графика, наличие СОЖ в исследованном температурном диапазоне поверхности оребрения $70\text{--}90$ °С не ухудшает интенсивность теплообмена и не увеличивает сопротивление пучка движению потока воздуха. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при указанной температуре у основания ребер происходит активное испарение летучей составляющей СОЖ, что приводит к самоочищению труб.

Это объясняет совпадение тепловых характеристик пучков труб БРТ на рис. 1. Стабильность аэродинамического сопротивления обусловлена тем, что СОЖ снижает шероховатость поверхности оребрения, а малая толщина пленки СОЖ не влияет на проходное сечение для воздуха в пучке. Таким образом, по теплоаэродинамическим условиям отсутствует необходимость в очистке от СОЖ БРТ АВО.

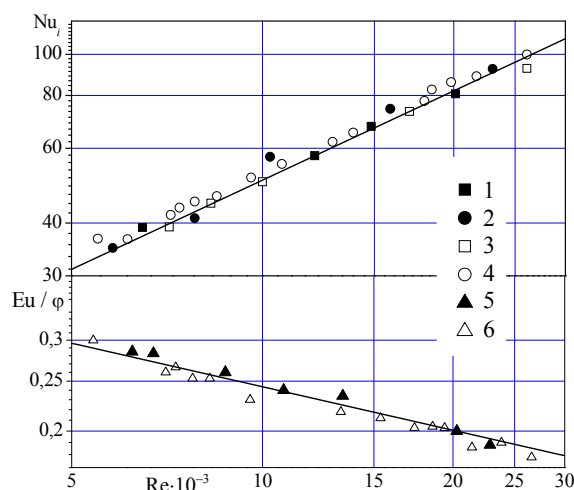


Рис. 1. Зависимости теплоотдачи третьего (1, 3), пятого (2, 4) рядов пучка и аэродинамического сопротивления (5, 6) пучков от числа Рейнольдса: 1, 2, 5 – при наличии смазочно-охлаждаемой жидкости (прокатной смазки); 3, 4, 6 – при отсутствии смазочно-охлаждаемой жидкости

Fig. 1. Dependences of heat transfer of the third (1, 3), fifth (2, 4) rows of the bundle and aerodynamic resistance (5, 6) of the bundles on the Reynolds number: 1, 2, 5 – in the presence of cutting fluid (rolling lubricant); 3, 4, 6 – in the absence of cutting fluid

Исследованный пучок является тесным по компоновке труб, а стабилизация теплоотдачи наступает со второго ряда. Теплоотдача стабилизированных 3-го и 5-го рядов описана уравнением, согласно рис. 1:

$$Nu_{3,5} = 0,08 Re^{0,7}. \quad (1)$$

Теплоотдача 1-го ряда пучка имеет интенсивность, меньшую на 25 % [2] по сравнению с характеристикой последующих рядов, и подчиняется уравнению подобия

$$Nu_1 = 0,063 Re^{0,7}. \quad (2)$$

Средняя теплоотдача пучка обобщена уравнением

$$Nu = 0,0776 Re^{0,7}. \quad (3)$$

Аэродинамическое сопротивление шестирядного пучка обобщается зависимостью

$$Eu = 49 Re^{-0,28}. \quad (4)$$

Уравнения (1)–(4) действительны в интервале числа Рейнольдса $Re = (5-28) \cdot 10^3$ и могут применяться для расчетов шахматных пучков из БРТ как очищенных от СОЖ, так и при наличии остатков СОЖ на поверхности оребрения труб.

Изготовление холодной накаткой БРТ АВО характеризуется прерывистым соприкосновением наружной поверхности несущей трубы с внутренней поверхностью оребренной оболочки. Наличие в зоне контакта зазоров, заполненных средой с низкими теплопроводными свойствами, вызывает стягивание линий теплового потока к точкам непосредственного контакта и соответственно искривлению изотерм. При теплопередаче это приводит к возникновению между элементами трубы разности температур Δt , °С, которая обуславливает термическое контактное сопротивление (ТКС) R_k , м²·К/Вт, вычисляемое количественно с помощью соответствующей формулы

$$R_k = \delta_{cp} / \lambda_3 = \Delta t_k / q_k, \quad (5)$$

где δ_{cp} – средняя толщина зазора между несущей трубой и оребренной оболочкой, м; λ_3 – средний коэффициент теплопроводности среды, заполняющей зазора, Вт/(м·К); $q_k = Q/F_k$ – плотность теплового потока в контактной области, Вт/м²; F_k – площадь контактирующих поверхностей, м².

Наличие ТКС в БРТ является основным недостатком и в случае некачественного соединения ребер с трубой, не поддающегося визуальному выявлению, может привести к уменьшению тепловой мощности АВО против проектной. Значение ТКС может существенно варьироваться в зависимости от ряда факторов: величины объема зазоров между внутренней несущей трубой и наружной ребристой оболочкой, теплопроводных свойств среды в контактной зоне, неровностей контактируемых поверхностей. Как правило, в промышленных БРТ зазор между внутренней несущей трубой и наружной ребристой оболочкой заполнен воздухом с характерным для газовых сред низким коэффициентом теплопроводности. Поэтому наличие этого зазора даже умеренных размеров, как правило, оказывает значительное влияние на коэффициент теплопередачи трубы.

Для измерения ТКС используется устройство [10], по конструкции аналогичное электродной трубе-калориметру кипящего типа, но дополненное датчиками температуры несущей трубы, необходимыми для расчета температурной разности Δt_k . Погрешность определения значения ТКС в экспериментах не превышала $\pm(5-7)$ %.

Относительная протяженность и средняя толщина зазора между несущей трубой и оребренной оболочкой зависят от технологии изготовления труб. На практике установлено, что при поперечно-винтовой прокатке БРТ по технологии ВНИИМЕТМАШ [11] в процессе формообразования профиля ребер из-за интенсивного и неравномерного истечения металла под

основанием оболочки (рис. 2а, б) образуется спиральный воздушный зазор (утяжина) со средней толщиной $\delta_{\text{ср}} = 0,1\text{--}0,2$ мм. Для увеличения плотности контакта (уменьшения протяженности и величины зазора) возможно применение технологии прокатки БРТ с дополнительной накаткой металла оболочки между ребрами обжимными дисками [12], установленными на одной оси с основными дисками (рис. 2с). После этого воздействия средняя толщина воздушного зазора уменьшается до $\delta_{\text{ср}} = 0,03\text{--}0,05$ мм (в 3–4 раза), а объемы утяжин под ребрами сокращаются, что обеспечивает практически беззазорное прилегание ребристой оболочки к несущей трубе. Толщина обжимных дисков постоянна и меньше межреберного зазора, а диаметр на 0,15–0,5 мм больше диаметра последнего основного диска.

После проведения теплоаэродинамических испытаний для определения относительной протяженности воздушного зазора между оболочкой и несущей трубой опытные образцы труб-калориметров разрезались фрезой вдоль диаметральной плоскости. Затем извлекалась несущая стальная труба, а неравномерности алюминиевой оболочки заполнялись раствором мелкодисперсионного гипса. На основе полученного слепка в масштабе $\varepsilon = 20$ вычерчивался профиль осевого сечения внутренней поверхности ребристой оболочки. К полученному графическому изображению профиля (профилограмме) проводилась касательная цилиндрическая поверхность, которая принималась за образующую наружной поверхности несущей трубы. Затем определялось значение относительной протяженности воздушного зазора ϕ , %, по формуле

$$\phi = \frac{1}{n s \varepsilon} \sum_1^n l_3 \cdot 100, \quad (6)$$

где n – количество замеренных межреберных участков с воздушным зазором; ε – масштаб увеличения слепка; l_3 – протяженность зазора в направлении, параллельном оси трубы, мм.

Средняя толщина воздушного зазора (рис. 2а) рассчитывалась по формуле

$$\delta_{\text{ср}} = \sum_1^n f_3 / \sum_1^n l_3 \cdot \frac{1}{\varepsilon}, \quad (7)$$

где f_3 – площадь продольного сечения воздушного зазора, мм².

Параллельно с определением параметров ϕ и $\delta_{\text{ср}}$ для исследованных труб-калориметров измеряли усилие выпрессовки F образца длиной 100 мм. Определение усилия выпрессовки является определяющим критерием оценки качества присоединения оболочки биметаллических ребренных труб на большинстве заводов-изготовителей БРТ. Данный механический метод контроля заключается в измерении усилия прессы, необходимого для выпрессовки несущей трубы из ребристой оболочки. При хорошем качестве изготовления БРТ усилие выпрессовки должно быть более 10 кН.

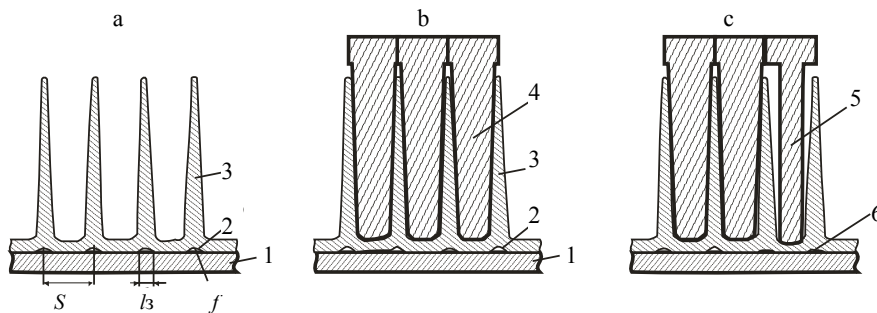


Рис. 2. Схемы: а – зоны контакта биметаллической ребристой трубы; б – винтовой прокатки без обжатия; с – то же с дополнительным обжатием основания ребра;
 1 – несущая труба; 2 – воздушный зазор; 3 – оребренная оболочка; 4 – накатные диски; 5 – обжимные диски; 6 – воздушные зазоры после обжатия

Fig. 2. Diagram of the: a – contact zone of the bimetallic ribbed tube; b – screw rolling without swagging; c – with additional swagging of the rib base;
 1 – bearing tube; 2 – air gap; 3 – ribbing; 4 – knurling disks; 5 – swage disks; 6 – air gaps after swagging

Геометрические параметры экспериментальных труб-калориметров приведены в табл. 1, а технологические параметры, определяющие величины ТКС в трубах-калориметрах, – в табл. 2.

Таблица 1

Геометрические параметры испытанных труб-калориметров
 Geometric parameters of the tested calorimeter tubes

Наименование параметра	Номер трубы-калориметра		
	1	2	3, 4
Наружный диаметр оребрения d , мм	49,35	49,46	50,72
Диаметр по основанию ребра d_0 , мм	27,11	27,66	29,72
Диаметр основания оболочки d_n , мм	25,0	25,0	25,0
Высота ребра h , мм	11,12	11,05	10,50
Средняя толщина ребра Δ , мм	0,75	0,95	1,0
Шаг ребер s , мм	3,33	3,33	3,36
Коэффициент оребрения φ	10,6	10,51	9,67

Таблица 2

Технологические параметры испытанных труб-калориметров
 Technological parameters of the tested calorimeter tubes

Наименование параметра	Номер трубы-калориметра			
	1	2	3	4
Накатка обжимными дисками	Нет	Да	Нет	Нет
Среда в контактном зазоре	Воздух	Воздух	Воздух	Масло
Относительная протяженность зазора ϕ , %	88,8	15,5	100	100
Средняя толщина зазора $\delta_{ср}$, мм	0,147	0,05	0,5	0,5
Средняя теплопроводность среды в зазоре λ_3 , Вт/(м·К)	0,668	0,385	0,111	0,217
ТКС $R_k \cdot 10^3$, м ² ·К/Вт	0,22	0,13	4,5	2,3
Усилие выпрессовки F , кН	50,0	44,8	0	0

Исследуемая труба-калориметр устанавливалась в центре 3-го ряда шестирядного шахматного пучка из БРТ следующих средних параметров: $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta = 49 \times 28 \times 10,5 \times 3,5 \times 0,85$ мм, коэффициент оребрения $\varphi = 9,4$. Поперечные и продольные шаги труб в пучке $S_1 = S_2' = 52$ мм. Результаты эксперимента показали, что дополнительное обжатие оребренной оболочки эффективно снижает термическое контактное сопротивление (перепад температуры на контакте). При числе Рейнольдса $Re = 15000$ разница температур Δt_k уменьшилась с $9,8$ °С у трубы-калориметра 1 до $6,2$ °С у трубы-калориметра 2.

На рис. 3 представлены зависимости ТКС от скорости воздуха в узком сечении пучка для обеих труб-калориметров. Как видно, величина ТКС практически не зависит от скорости воздуха в исследованном диапазоне. При этом применение обжатия ребер дополнительными дисками на трубах с двухзаходным ребром и коэффициентом оребрения $\varphi \approx 9$ позволило уменьшить значение ТКС в 1,7 раза. Тепловая проводимость контакта $\alpha_k = 1/R_k = 1/(0,13 \cdot 10^{-3}) = 7692$ Вт/(м²·К) трубы-калориметра 2 сопоставима с наиболее интенсивными процессами теплообмена (конденсации водяного пара и других сред). Следовательно, если обеспечивается качественный технологический регламент накатывания ребер, то биметаллический контакт практически не препятствует передаче теплового потока.

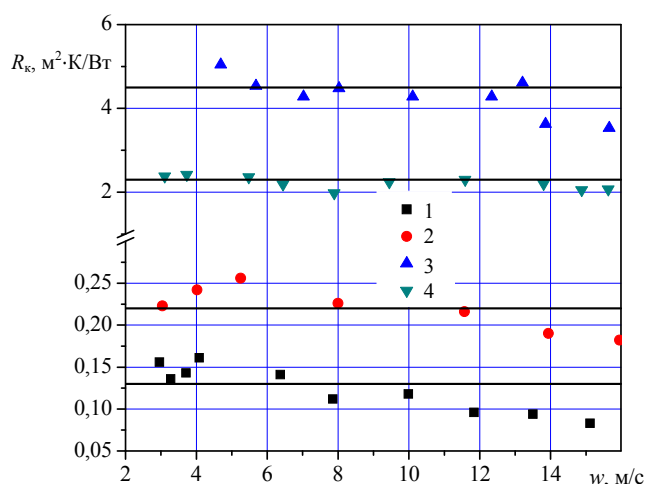


Рис. 3. Контактное термическое сопротивление БРТ с различными условиями накатки и разной средой в зазоре: 1, 2, 3, 4 – номера труб-калориметров

Fig. 3. Contact thermal resistance of the bimetallic ribbed pipe with different knurling conditions and different environments in the gap: 1, 2, 3, 4 – tube calorimeter numbers

Для количественной оценки изменения интенсивности теплопередачи в трубе с улучшенным контактом были экспериментально определены коэффициенты теплопередачи $k = Nu_k \cdot \lambda / d_0$ труб-калориметров 1 и 2 при идентичных условиях.

Теплоотдача трубы-калориметра без накатки обжимными дисками обобщена уравнением

$$Nu_k = 0,29 Re^{0,53} . \quad (8)$$

Теплоотдача трубы-калориметра с накаткой обжимными дисками обобщена уравнением

$$Nu_k = 0,19 Re^{0,58} . \quad (9)$$

Как видно из рис. 4а, величины прироста интенсивности теплопередачи за счет дополнительной накатки обжимными дисками линейно зависят от числа Рейнольдса (аэродинамического режима эксплуатации АВО). У трубы-калориметра 2 коэффициент теплопередачи выше, чем у трубы-калориметра 1 на 4,2 % при $Re = 15000$ и на 7,1 % при $Re = 30000$. Уменьшение термического сопротивления контакта вследствие дополнительного обжатия оребренной оболочки подтверждается также данными табл. 2 – средняя расчетная толщина воздушного зазора сократилась в 2,94 раза (до 0,05 мм). Следовательно, площадь плотно соприкасающихся поверхностей для передачи теплоты теплопроводностью несущей трубы и оболочки БРТ также увеличилась приблизительно в 3 раза.

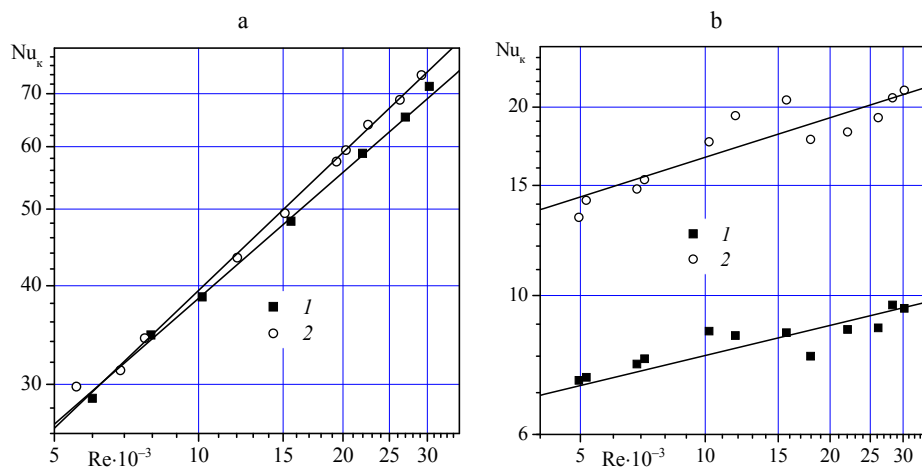


Рис. 4. Теплопередача труб-калориметров: 1 – без накатки обжимными дисками; 2 – с накаткой обжимными дисками; 3 – с воздушным зазором; 4 – с маслом в зазоре

Fig. 4. Heat transfer of calorimeter tube: 1 – without knurling by swage disks; 2 – with knurling; 3 – with air gap; 4 – with oil in the gap

Несмотря на это, усилие выпрессовки F трубы-калориметра 2 снизилось на 11 % по сравнению с усилием для трубы-калориметра 1 (табл. 2). Это указывает на то, что усилие выпрессовки не может служить основным критерием оценки качества присоединения оболочки биметаллических оребренных труб. Достаточность механического прижатия ребристой оболочки к поверхности несущей трубы не определяется величиной усилия

выпрессовки, так как это усилие существенно зависит также от величины шероховатости наружной поверхности несущей трубы, замасленности (загрязненности) зоны контактирования оболочки с несущей трубой, перекоса пуансона в матрице пресса. Относительная протяженность воздушного зазора ϕ более объективно характеризует состояние контакта. Однако при экспресс-контроле определять этим параметром качество изготовления биметаллических труб проблематично из-за трудоемкости его вычисления.

Большие значения ТКС против теплоэнергетически обоснованных обычно возникают в процессе изготовления биметаллических труб при нарушении технологического режима обрешения и не поддаются прямому наружному контролю. В трубе-калориметре 3 установлено наличие кольцевого зазора по всей окружности контакта несущей трубы и ребристой оболочки с шириной зазора $\delta_{\text{ср}} = 0,5 \pm 0,05$ мм. Данный зазор возник вследствие технического брака в изготовлении БРТ при процессе раскатки алюминиевой оболочки с несущей трубой из-за технологических особенностей производства на станках ХПРТ. Экспериментальное исследование таких БРТ позволяет не только оценить влияние воздушного зазора на интенсивность теплопередачи, но и определить минимально возможную теплопроизводительность пучка из некачественных труб.

Перед опытом несущая труба центрировалась относительно ребристой оболочки для исключения непосредственного контактирования обоих элементов трубы. Для создания замкнутого воздушного пространства по всей окружности зазора оба торца трубы герметизированы эпоксидным клеем. Таким образом были созданы условия для теплообмена естественной конвекцией в ограниченном объеме.

Для трубы-калориметра 3 получено следующее среднее значение контактного сопротивления: $R_k = 0,45 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ (рис. 3). Теплопроводимость контакта $\alpha_k = 1/R_k = 1/(0,45 \cdot 10^{-2}) = 222 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ трубы-калориметра 3 в 10–30 раз меньше коэффициента теплоотдачи жидкости при турбулентном течении в трубе. В данном случае термическое сопротивление биметаллического контакта может привести к существенному снижению производительности теплообменного пучка.

Полученные результаты показали, что при числе Рейнольдса $Re = 15000$ перепад температуры в зазоре составлял $\Delta t_k = 33,4$ °С, что в 3,34 раза превышает значение для трубы-калориметра 1 с меньшим в $\delta_{3,\text{ср}} / \delta_{1,\text{ср}} = 0,5 / 0,147 = 3,4$ раза зазором. Следовательно, перепад температуры прямо пропорционален толщине воздушного зазора, а термическое сопротивление теплопередачи через контакт определяется, прежде всего, объемами межконтактных воздушных зазоров.

Теплоотдача трубы-калориметра с воздушным зазором обобщена уравнением

$$Nu_k = 1,84 Re^{0,16}. \quad (10)$$

При числе Рейнольдса $Re = 15\,000$ величина теплового потока через трубу-калориметр 3 уменьшилась в 6,1 раза, а коэффициент теплопередачи (рис. 4b) – в 5,4 раза по сравнению с соответствующими параметрами трубы-калориметра 1.

Для исследования влияния теплопроводности среды кольцевой зазор между несущей трубой и ребристой оболочкой трубы-калориметра 3 был заполнен турбинным маслом (далее труба-калориметр 4). Теплоотдача трубы-калориметра с заполненным турбинным маслом зазором обобщена уравнением

$$Nu_k = 2,4Re^{0,21}. \quad (11)$$

При числе Рейнольдса $Re = 15000$ перепад температуры на контакте не уменьшился по сравнению с данными трубы-калориметра 3 ($\Delta t_k = 34\text{ }^\circ\text{C}$), но коэффициент теплопередачи увеличился в 1,72 раза (рис. 4b). Следовательно, улучшение теплопередающих характеристик трубы-калориметра 4 обусловлено, прежде всего, увеличением коэффициента теплопроводности среды в кольцевом зазоре (теплопроводность турбинного масла выше теплопроводности воздуха примерно в четыре раза). Для трубы-калориметра 4 получено следующее среднее значение контактного сопротивления: $R_k = 0,23 \cdot 10^{-2}\text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$ (рис. 3). Таким образом, наличие масла (или замасленности) в зоне контакта биметаллической трубы интенсифицирует теплопередачу.

Для изучения влияния на ТКС консервационной смазки несущая труба трубы-калориметра 3 была извлечена из ребристой оболочки, ее поверхность обработана слоем солидола марки «С», а затем несущая труба вновь установлена в ребристую оболочку. Во ВНИИМЕТМАШ собранная конструкция БРТ на стане ХПРТ подвергнута накатке дополнительными обжимными дисками толщиной $\sim 1,8$ мм во впадинах между ребрами на величину 0,25–0,30 мм. В результате средняя толщина контактного зазора составила $\delta_{cp} = 0,06$ мм, а относительная протяженность его $\phi = 18,4\%$, что свидетельствует о полной ликвидации воздушного кольца у трубы-калориметра 3. Значение ТКС для БРТ с солидолом в контактной зоне составило $R_k = 0,23 \cdot 10^{-3}\text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$, что хорошо коррелируется с ТКС трубы-калориметра 2 и в 19,6 раза меньше трубы-калориметра 3 (теплопроводность солидола значительно больше теплопроводности воздуха).

Таким образом, по тепловым характеристикам БРТ АВО расконсервацию несущих труб от смазки выполнять нецелесообразно.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментальными исследованиями установлено, что СОЖ на поверхности накатных алюминиевых ребер БРТ не ухудшает интенсивность теплоотдачи (теплопередачи) и аэродинамическое сопротивление пучков теплообменной секции АВО.

2. Наличие дополнительных обжимных дисков на станах ХПРТ увеличивает теплопередачу на 8–13 %. При этом усилие выпрессовки не может являться основным критерием оценки качества изготовления биметаллических оребренных труб.

3. В контактной зоне БРТ любая среда с коэффициентом теплопроводности, больше чем у воздуха, снижает термическое контактное сопротивление и является интенсифицирующим фактором теплопередачи.

4. По тепловой характеристике БРТ АВО целесообразно удалять консервационную смазку или другое масло с наружной поверхности несущих труб.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: справ. / под общ. ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессонного. СПб.: Недра. 1996. 512 с.
2. Легкий, В. М. Некоторые особенности теплообмена в поперечно-обтекаемых пучках труб с внешним спирально-ленточным оребрением / В. М. Легкий, Ю. К. Тупицын // Изв. вузов. Энергетика. 1978. № 2. С. 86–90.
3. Кунтыш, В. Б. Теплоотдача и энергетическая эффективность шахматных пучков аппаратов воздушного охлаждения из оребренных труб различных геометрических параметров / В. Б. Кунтыш, А. Э. Пиир // Изв. вузов. Энергетика. 1990. № 7. С. 71–75.
4. Кунтыш, В. Б. Исследование влияния формы поперечного сечения спирального ребра на тепловую эффективность шахматного пучка / В. Б. Кунтыш, А. Н. Бессонный, А. Э. Пиир // Изв. вузов. Энергетика. 1998. № 5. С. 67–74.
5. Володин, В. И. Приближенный тепловой расчет конденсатора перегретого пара тепловых насосов / В. И. Володин, С. В. Здитовецкая // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 3. С. 250–262. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-250-262>.
6. Сухоцкий, А. Б. Конвективная теплоотдача однорядных пучков из труб с накатными алюминиевыми ребрами различной высоты при малых числах Рейнольдса / А. Б. Сухоцкий, Е. С. Данильчик // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 4. С. 336–348. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-336-348>.
7. Кунтыш, В. Б. Исследования теплоаэродинамических и габаритно-массовых характеристик шахматных стесненных пучков труб со спиральнонакатными ребрами / В. Б. Кунтыш, Н. Н. Стенин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2001. № 3. С. 89–97. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2001-0-3-89-97>.
8. Кунтыш, В. Б. Теплоаэродинамические исследования шахматных пучков для выбора эффективного шага круглоребристых труб / В. Б. Кунтыш [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 3. С. 264–279. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-264-279>.
9. Кунтыш, В. Б. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения / В. Б. Кунтыш, Н. М. Кузнецов. СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 280 с.
10. Кунтыш, В. Б. Исследование контактного термического сопротивления биметаллических оребренных труб АВО / В. Б. Кунтыш, А. Э. Пиир, Л. М. Федотова // Изв. вузов. Лесной журнал. 1980. № 5. С. 121–126.
11. Васильчиков, М. В. Поперечно-винтовая прокатка изделий с винтовой поверхностью / М. В. Васильчиков, М. М. Волков. М.: Машиностроение, 1968. 140 с.
12. Способ производства биметаллических ребристых труб: а. с. СССР № 217344, кл. В 21В 16/01 / Ф. П. Кирпичников, В. П. Анисифоров, М. Г. Панфилов. Оpubл. 07.05.1968.

Поступила 14.12.2024 Подписана в печать 16.01.2025 Опубликовано онлайн 31.03.2025

REFERENCES

1. Fundamentals of Calculation and Design of Air-Cooled Heat Exchangers. Handbook / Ed. by V. B. Kuntysh, A. N. Bessonnyi. St. Petersburg: Nedra [The Bowels] Publ. 1996. 512 p. (in Russian).
2. Legkii V. M., Tupitsyn Yu. K. (1978) Some Features of Heat Exchange in Transversely Streamlined Bundles of Pipes with External Spiral Ribbon Ribs, *ENERGETIKA. Proceedings of the USSR Higher Education Institutions*. No 2, p. 86–90 (in Russian).
3. Kuntysh V. B. (1990) Heat Transfer and Energy Efficiency of Staggered Bundles of Air Cooling Devices Made of Ribbed Pipes of Various Geometric Parameters *ENERGETIKA. Proceedings of the USSR Higher Education Institutions*, No 7, p. 71–75. (in Russian)
4. Kuntysh V. B., Bessonnyi A. N., Piiir A. E. (1998) Study of the Influence of the Shape of the Cross-Section of the Spiral Rib on the Thermal Efficiency of the Staggered Bundle. *ENERGETIKA. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*. No 5, p. 67–74. (in Russian)
5. Volodin V.I., Zditovetskaya S.V. Approximate Thermal Calculation of the Superheated Steam Condenser of Heat Pumps. *ENERGETIKA. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*. 2022; 65 (3): 250–262. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-250-262> (in Russian).
6. Sukhotski A.B., Danil'chik E.S. Convective Heat Exchange of Single-Row Bundles from Tubes with Rolled Aluminum Fins of Various Height at a Low Values of the Reynolds Number. *ENERGETIKA. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*. 2021; 64 (4): 336–348. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-336-348> (in Russian).
7. Kuntysh V. B., Stenin N.N. (2001) Studies of Thermal-and-Aerodynamic as well as Dimensional-Mass Characteristics of Staggered Cramped Bundles of Pipes with Spiral-Rolled Ribs // *ENERGETIKA. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, No 3. P. 89–97. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2001-0-3-89-97> (in Russian).
8. Kuntysh V. B., Sukhotskii A. B., Marshalova G. S., Dudarev V. V., Farafontov V. N. Thermal and Aerodynamic Researches of Staggered Bundles for Choice of an Effective Spacing of Round-Finned Tubes. *ENERGETIKA. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*. 2019; 62 (3): 264–279. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-264-279> (in Russian).
9. Kuntysh V. B., Kuznetsov N. M. (1992) Thermal and Aerodynamic Calculations of Finned Air Cooling Heat Exchangers. St.-Petersburg, Energoatomizdat Publ. 280 (in Russian).
10. Kuntysh V. B., Piiir A. E., Fedotova L. M. (1980) The Study of Contact Thermal Resistance of Bi-metallic Finned Tubes of Air Cooling Apparatuses. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii "Lesnoi Zhurnal" = Bulletin of Higher Educational Institutions Forestry Journal.*, (5). P. 121–126 (in Russian).
11. Vasil'chikov M. V., Volkov M.M. Transverse-helical rolling of products with a helical surface. Moscow: Mashinostroenie [Mechanical Engineering] Publ., 1968. 140 p. (in Russian).
12. Kirpichnikov F. P., Anisiforov V. P., Panfilov M. G. Method of Production of Bimetallic Ribbed Pipes: A. C. USSR No 217344, IPC B 21B 16/01. Published on 05.07.1968 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-154-174>

УДК 621.644.2.02.07:620.197.5

Развитие методологии технического диагностирования трубопроводов газораспределительной системы и анализ эффективности способов восстановления их работоспособности

Асп. С. Ф. Гориченко¹⁾

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

Реферат. Главным требованием к функционированию газораспределительной системы является обеспечение ее надежности, безопасности и эффективности эксплуатации при снижении нагрузки на окружающую среду, начиная от источников газоснабжения до конечных потребителей газа. При этом необходимы поддержание всех объектов газораспределительной системы в технически исправном состоянии, их постоянное обновление и развитие. На сегодняшний день актуальной проблемой становятся старение и износ находящихся в эксплуатации объектов газораспределительной системы (распределительных газопроводов, газорегуляторных пунктов, шкафных регуляторных пунктов, средств электрохимической защиты стальных газопроводов). В статье рассматриваются структура и динамика роста протяженности стальных подземных газопроводов, эксплуатируемых в г. Минске и Минском районе, в зависимости от длительности эксплуатации. Представлены результаты лабораторных исследований фактического состояния стальных труб с различными сроками службы. Определена степень деградации структуры, механических свойств и химического состава образцов металла стальных газопроводов подземного залегания с различными сроками эксплуатации. Приведены способы оценки фактического состояния изоляционного покрытия стальных подземных газопроводов. Проведен анализ результатов измерений электрического переходного сопротивления изоляционного покрытия, полученных в полевых и лабораторных условиях. Представлены расчет остаточного ресурса изоляционного защитного покрытия на примере мастичной битумной изоляции путем определения фактической постоянной времени старения и способ оценки по изменению их энергии активации термоокислительной деструкции в качестве метода определения остаточного ресурса изоляционного покрытия стальных подземных газопроводов. Определены значения энергии активации для мастичных защитных битумных покрытий стальных подземных газопроводов с различными сроками эксплуатации, в том числе и для предельного состояния. Предложена методика технического диагностирования стальных подземных газопроводов с учетом агрегированных статистических данных. Описан способ приоритизации объектов газораспределительной системы.

Ключевые слова: газопровод, энергия активации, термодеструкция, остаточный ресурс, срок службы, мастичное битумное покрытие, надежность, эксплуатация, переходное сопротивление

Для цитирования: Гориченко, С. Ф. Развитие методологии технического диагностирования трубопроводов газораспределительной системы и анализ эффективности способов восстановления их работоспособности / С. Ф. Гориченко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 2. С. 154–174. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-154-174>

Адрес для переписки

Гориченко Сергей Ф.
Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65/2,
220113, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 308-26-25
pte@bntu.by

Address for correspondence

Gorichenko Sergey F.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavistimosti Ave.,
220113, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 308-26-25
pte@bntu.by

Development of a Methodology for Technical Diagnostics of Pipelines of the Gas Distribution System and Analysis of the Effectiveness of Ways to Restore their Operability

S. F. Gorichenko¹⁾

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

Abstract. The main requirement for the functioning of a gas distribution system – starting from gas supply sources to end-users of gas – is to ensure its reliability, safety and operational efficiency while reducing the burden on the environment, from gas supply sources to end users of gas. At the same time, it is necessary to maintain all facilities of the gas distribution system in a technically sound condition, their constant updating and development. So, the aging and wear of the gas distribution system facilities in operation (gas distribution pipelines, gas control points, cabinet control points, electrochemical protection equipment for steel gas pipelines) is currently becoming an urgent problem. The article discusses the structure and growth dynamics of the length of steel underground gas pipelines operated in Minsk and the Minsk region, depending on the duration of operation. The results of laboratory studies of the actual state of steel pipes with different service lives are presented. The degree of degradation of the structure, mechanical properties and chemical composition of metal samples of steel underground gas pipelines with different service lives has been determined. The methods for assessing the actual state of the insulating coating of steel underground gas pipelines are presented. The analysis of the results of measurements of the electrical transient resistance of the insulating coating obtained in the field and laboratory conditions is carried out. The calculation of the residual life of an insulating protective coating is presented using the example of mastic bitumen insulation by determining the actual aging time constant, and a method for estimating changes in their activation energy of thermal and oxidative degradation as a method for determining the residual life of the insulating coating of steel underground gas pipelines is given, too. The values of the activation energy for mastic protective bitumen coatings of steel underground gas pipelines with different service life, including the limiting state, have been determined. A technique for technical diagnostics of steel underground gas pipelines is proposed, taking into account aggregated statistical data. A method for prioritizing gas distribution system facilities is described.

Key words: gas pipeline, activation energy, thermal destruction, residual resource, service life, mastic bitumen coating, reliability, operation, transition resistance

For citation: Gorichenko S. F. (2025) Development of a Methodology for Technical Diagnostics of Pipelines of the Gas Distribution System and Analysis of the Effectiveness of Ways to Restore their Operability. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (2), 154–174. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-154-174> (in Russian)

Введение

Главным требованием к функционированию газораспределительной системы является обеспечение ее надежности, безопасности и эффективности эксплуатации при снижении нагрузки на окружающую среду на всем ее протяжении – от источников газоснабжения до конечных потребителей газа [1]. При этом необходимы поддержание всех объектов энергораспределительной системы в технически исправном состоянии, их постоянное обновление и развитие [2]. На сегодняшний день актуальной проблемой становится старение и износ находящихся в эксплуатации объектов газораспределительной системы (распределительных газопроводов, газорегуляторных пунктов, шкафных регуляторных пунктов, средств электрохимической защиты стальных газопроводов) [3].

В настоящее время на балансе УП «МИНГАЗ» находится 2217 км стальных газопроводов с различными сроками эксплуатации. Из рис. 1

видно, что значительную долю газопроводов составляют газопроводы со сроком службы более 40 лет и если не предпринимать никаких мер, то их протяженность увеличится более чем в 1,5 раза (рис. 2). Очевидно, что интенсивное старение газопроводов негативно влияет на уровень надежности объектов газораспределительной системы, поэтому актуальным является оценка остаточного ресурса трубопроводов до наступления предельного состояния и определения рациональных подходов к их ремонту.

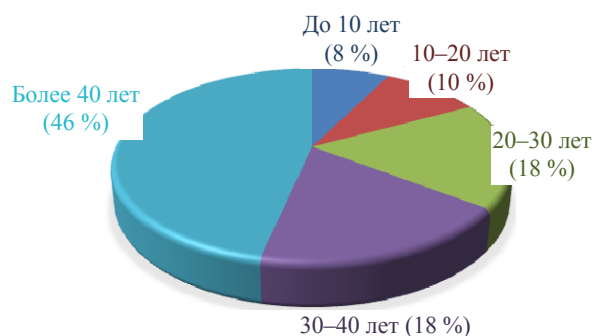


Рис. 1. Распределение газопроводов в зависимости от длительности эксплуатации

Fig. 1. Distribution of gas pipelines depending on the duration of operation

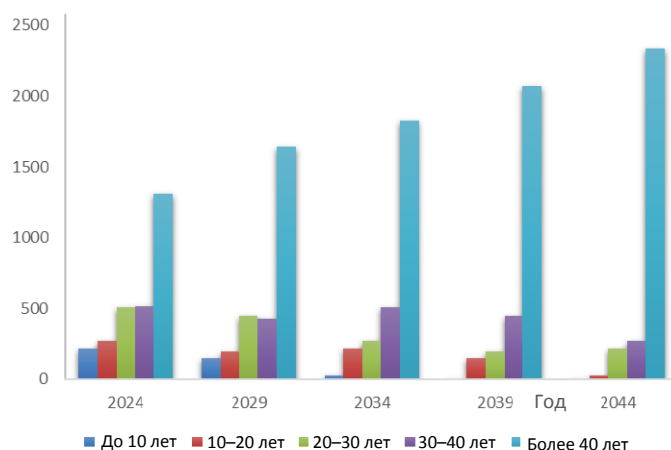


Рис. 2. Динамика роста протяженности (км) газопроводов с различными сроками эксплуатации

Fig. 2. Dynamics of growth in the length (km) of gas pipelines with different service life

Предельное состояние строительного объекта – такое состояние, при достижении которого его дальнейшая эксплуатация недопустима, затруднена или нецелесообразна [4]. Предельным состоянием для газопровода является неспособность выполнять функцию по транспортировке природного газа, т. е. потеря герметичности. Подземный газопровод состоит из трех основных элементов: стальной трубы, сварного соединения, защитного изоляционного покрытия [5], и утрата служебных свойств каждого из них может привести в итоге к потере герметичности газопровода [6]. Следовательно, при оценке остаточного ресурса газопроводов необходимо

уделить внимание изучению степени деградации каждого из этих элементов в зависимости от длительности эксплуатации [7].

Экспериментальная и аналитическая часть

Исследование состояния металла. Согласно [8], коррозионное состояние металла и изоляционного покрытия трубы определяется методом шурфов грунта, что позволяет осуществить визуальный контроль конструкций. Контроль фактического состояния трубопроводов производится в основном в лабораторных условиях, где определяются фактические механические свойства основного металла и сварных соединений, измеряются уменьшения фактической толщины стенки вследствие коррозионных процессов, оценивается накопленная поврежденность основного металла. При проведении исследований главной базой для испытаний являлись элементы газопроводов УП «МИНГАЗ».

Методика подготовки образцов, проведения испытаний и обработки их результатов основывается на [9, 10]. В процессе испытаний записывается первичная диаграмма растяжения, показывающая функциональную зависимость между нагрузкой, действующей на образец, и вызываемой ею деформацией. По геометрическим размерам образца до и после испытаний и параметрам машинной диаграммы «усилие – перемещение» путем расчетов определяются служебные свойства металла газопровода. Механические испытания на одноосное растяжение основного металла проводились при температуре плюс 20 °С на универсальной разрывной машине с определением базовых (сертификатных) характеристик механических свойств, параметров кривой упрочнения и предельных состояний исследуемого металла. Результаты испытаний образцов показали, что даже после длительной эксплуатации трубопроводов металл труб по прочностным характеристикам (предел прочности, предел текучести) удовлетворяет требованиям нормативной документации [11–14].

Одним из ключевых механизмов охрупчивания и снижения коррозионной стойкости длительно эксплуатируемых трубопроводов является распад цементита, сопровождающийся измельчением его пластин и увеличением общей протяженности границ зерен [15, 16]. При этом границы зерен являются препятствием для перемещения дислокаций, что приводит к упрочнению кристаллов и росту внутренних напряжений, создавая условия для коррозии под напряжением. Для оценки состояния микроструктуры стали после длительной эксплуатации проведены металлографические исследования основного металла труб газопроводов УП «МИНГАЗ» на бездефектных участках и участках со следами коррозионных повреждений. Для этого из действующих объектов газораспределительной системы вырезали образцы стальных труб в виде катушек диаметром от 57 до 529 мм со сроками эксплуатации от 10 до 60 лет (низкого, среднего и высокого давления), находящихся в грунтах с разной коррозионной активностью. Металлографическими исследованиями установлено, что структура труб

газораспределительной системы после длительной эксплуатации в целом соответствует требованиям действующих стандартов. Деградации механических свойств, изменения модуля Юнга и коэффициента Пуассона в участках, непосредственно примыкающих к дефектным зонам, не обнаружено: механические свойства соответствуют требованиям, предъявляемым к углеродистым сталям [17]. Факторы, отрицательно влияющие на склонность основного металла труб к хрупкому разрушению и снижающие прочностные свойства, в микроструктуре обследованных труб не выявлены. Таким образом, длительная эксплуатация в слабо нагруженных условиях (максимальное рабочее давление 0,005–0,300 МПа, в отдельных случаях 1,2 МПа; температура эксплуатации не ниже плюс 5 °С; диаметр труб 57–219 мм; толщина стенки до 6 мм) не приводит к видимым методами оптической металлографии изменениям структуры металла.

Также был проведен анализ химического состава сталей образцов газопроводов для оценки изменений в условиях длительной эксплуатации [18]. Химический состав испытываемых образцов анализировался на оптико-эмиссионном спектрометре MiniLab-150. Результаты исследований представлены в табл. 1. Анализ химического состава сталей после длительной эксплуатации не выявил отклонений от требований, предъявляемых к сталям при их производстве. Рабочая среда (природный газ) в условиях температур эксплуатации (плюс 5–20 °С) не является науглероживающей и не способствует изменению химического состава сталей.

Таблица 1

Состав образцов сталей
Composition of steel samples

№ пробы	Содержание элементов, % мас.			
	C	Si	Mn	Cr, не более
1	0,14	0,22	0,48	–
2	0,14	0,22	0,49	–
3	0,13	0,22	0,46	–
4	0,13	0,22	0,46	–
ГОСТ 1050–86	0,07–0,14	0,17–0,37	0,35–0,65	0,15

Исследование состояния изоляционных покрытий. Одной из ключевых характеристик изоляционного покрытия, определяющих его работоспособность, является переходное электрическое сопротивление, минимальное допустимое значение которого регламентировано и составляет не менее 400 Ом·м² [16]. Переходное электрическое сопротивление R определяется во всех шурфах, отрываемых в процессе эксплуатации подземного газопровода при его ремонте, реконструкции и ликвидации коррозионных повреждений или повреждений изоляции [8, 19].

В рамках работы, проводимой в системе ГПО «Белтопгаз», направленной на исследование состояния объектов газораспределительной системы,

проведен сравнительный анализ методов определения R в полевых и лабораторных условиях по стандартным методикам [20].

На рис. 3 представлена зависимость переходного электрического сопротивления образцов от условий измерения. Как видно, значения переходного электрического сопротивления, полученные в лабораторных условиях, ниже (в несколько раз), чем значения, полученные в полевых условиях. Это обусловлено тем, что при измерении в лабораторных условиях происходит более длительное воздействие электролита на битумное покрытие. Необходимо отметить, что причиной более высоких значений переходного электрического сопротивления, полученных в полевых условиях, может служить то, что дефекты покрытия сложной геометрии (извилистые поры, трещины и т. д.) за короткий промежуток испытаний в полевых условиях не заполняются электролитом. В лабораторных условиях наблюдалось значительное уменьшение переходного электрического сопротивления образцов во времени, вероятно, вызванное заполнением дефектов электролитом. Таким образом, измерение переходного электрического сопротивления в лабораторных условиях позволяет более достоверно оценить качество изоляционного материала газопровода.

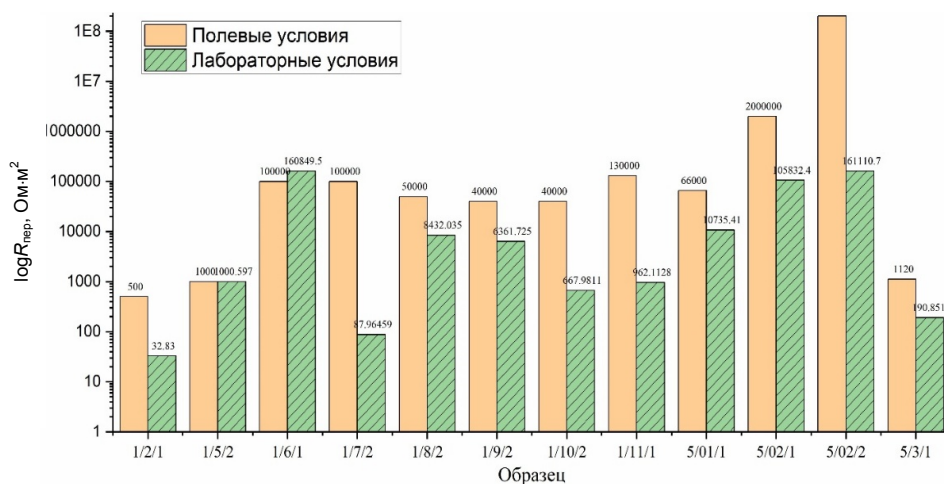


Рис. 3. Зависимость переходного электрического сопротивления образцов от условий измерения

Fig. 3. Dependence of the transient electrical resistance of samples on the measurement conditions

На стадии проектирования предельный срок службы защитного покрытия может быть определен по формуле [21]

$$t_n = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{R_n}{R_k}, \quad (1)$$

где R_n – начальное значение переходного электрического сопротивления защитного покрытия на газопроводе, Ом·м², для битумной изоля-

ции $R_n \geq 5 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$; R_k – предельно допустимое значение переходного электрического сопротивления защитного покрытия газопровода; α – постоянная времени старения защитного покрытия [21], год^{-1} , для битумных и полимерных ленточных покрытий – $0,125 \text{ года}^{-1}$.

Таким образом, получаем расчетный предельный срок службы для битумно-мастичной изоляции, равный [22]

$$t_n = \frac{1}{0,125} \ln \frac{5 \cdot 10^4}{400} = 40 \text{ лет.}$$

Для расчета фактической постоянной времени старения α_ϕ защитного покрытия в [23] предлагается формула

$$\alpha_\phi = \frac{\ln b_0 \sum_{i=1}^n \tau_i - \sum_{i=1}^n (\tau_i \ln b_i)}{\sum_{i=1}^n \tau_i^2}. \quad (2)$$

Для коэффициентов b_0 и b_i соответственно имеем:

$$b_0 = R_n - R_k; \quad (3)$$

$$b_i = R_i - R_k, \quad (4)$$

где R_n – начальное значение переходного сопротивления, $\text{Ом} \cdot \text{м}^2$; R_k – конечное значение переходного сопротивления, $\text{Ом} \cdot \text{м}^2$; R_i – измеренное значение переходного сопротивления трубопровода $\text{Ом} \cdot \text{м}^2$; τ – время эксплуатации газопровода, лет.

Исходя из описанных выше подходов, используем для расчета фактической постоянной времени старения и срока службы защитного покрытия данные о переходном электрическом сопротивлении битумных защитных покрытий образцов стальных труб, полученные в ходе измерений в лабораторных условиях. На основании полученных данных рассчитана фактическая постоянная времени старения битумно-мастичного защитного покрытия [22]

$$\alpha_\phi = 0,0214 \text{ года}^{-1}.$$

Соответственно получаем расчетный срок службы изоляционного покрытия эксплуатируемых газопроводов [22]

$$t_n = \frac{1}{0,214} \ln \frac{50000}{400} = 225,3 \text{ года.}$$

Однако из-за относительно большой погрешности метода «мокрого контакта», применяемого газоснабжающими организациями в полевых условиях, и затратности по времени (более 100 сут.) способа определе-

ния R в лабораторных условиях необходимо применение альтернативных подходов к оценке ресурса изоляционного защитного покрытия. Наиболее прогрессивным в нашем случае является способ оценки остаточного ресурса защитного покрытия по изменению энергии активации термоокислительной деструкции [24], т. е. способ оценки долговечности полимерных изделий расчетным путем по экспериментально определенному значению энергии активации E_d , определенному в лабораторных условиях, и долговечности изделий, изготовленных из полимерных материалов. Применение данного способа к объектам газораспределительной системы показало хорошую точность наряду с относительно небольшими затратами по времени [25, 26]. Например, для образца 1962 г. ввода в эксплуатацию [26] полученная термогравиметрическая кривая имеет следующий вид (рис. 4). Значение энергии активации $E_d = 9,49 \cdot 8,31 = 79$ кДж/моль, остаточный ресурс работоспособности $\tau_{10^0} = 4,6$ года.

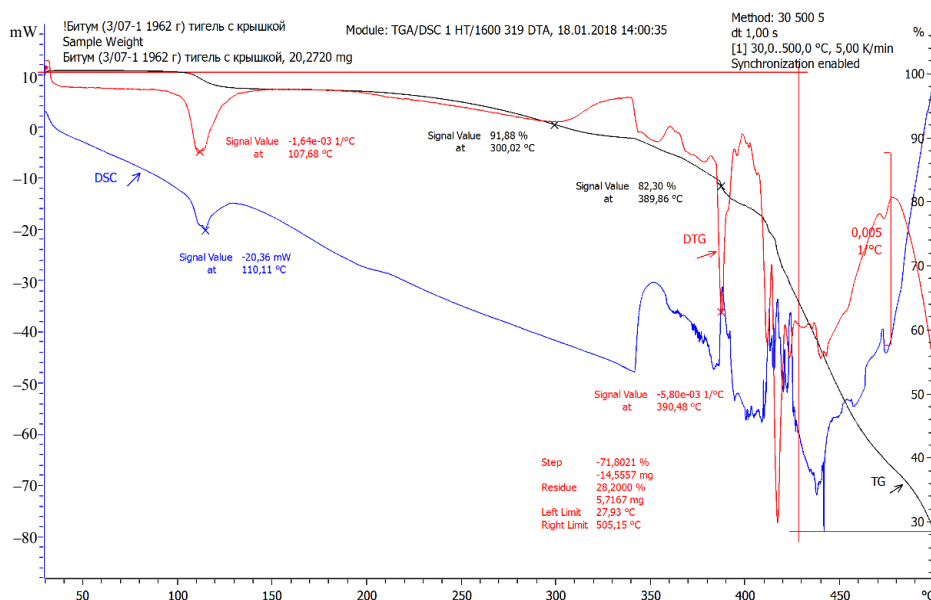


Рис. 4. Термогравиметрическая кривая для образца с защитной мастичной изоляцией

Fig. 4. Thermogravimetric curve for a sample with protective mastic insulation

Техническое диагностирование с приоритизацией объектов газораспределительной системы. В Республике Беларусь для диагностирования стальных подземных газопроводов газоснабжающими организациями ГПО «Белтопгаз» применяется балльная методика [27]. Оценка остаточного ресурса проводится по основным критериям: герметичности, состоянию изоляционных покрытий и металла трубы, качеству сварных соединений (в случае наличия такового в шурфе), коррозионной опасности.

При таком подходе необходимо излишнее количество измерительных операций, результатом которых является определение параметров на огра-

ниченных размером шурфа локальных участках, что в итоге не позволяет оценить работоспособность всего объекта после длительной эксплуатации. Для оптимизации способов технической диагностики стальных подземных газопроводов целесообразно использование методики оценки надежности газопровода и продления его ресурса с учетом агрегированных статистических данных [28].

Методика базируется на том, что надежность объекта в процессе эксплуатации описывается зависимостью интенсивности отказов объекта от времени эксплуатации [28, 29].

В период износа функция надежности в соответствии с распределением Вейбулла [30] имеет вид

$$P(t) = \exp(-\lambda t^\alpha), \quad (5)$$

где t – момент диагностики (количество полных лет эксплуатации, считая от даты предыдущего диагностирования), лет; λ – интенсивность отказов (параметр потока отказов), $1/(\text{км}\cdot\text{год})$; α – параметр формы.

Интенсивность отказов, характеризующая скорость их возникновения в различные моменты работы объекта, вычисляется по формуле

$$\lambda = \frac{\Delta n(t)}{N_p \Delta t}, \quad (6)$$

где $\Delta n(t)$ – число отказавших элементов за промежуток времени Δt ; N_p – число работоспособных элементов на момент диагностики t .

Интенсивность отказов λ и время t , за которое газопровод достигнет плановой надежности $P_{\text{пл}} = 0,95$ (время продления ресурса), определяются следующим образом:

- в период нормальной эксплуатации:
 λ принимается постоянной,

$$t = -\ln(P_{\text{пл}}) / \lambda; \quad (7)$$

- в период износа:

$$\lambda(t) = \lambda \alpha t^{\alpha-1}; \quad (8)$$

$$t = (-\ln(P_{\text{пл}}) / \lambda)^{1/\alpha}. \quad (9)$$

В табл. 2 приведены значения расчетных параметров λ стальных газопроводов в зависимости от их диаметра и толщины стенки [29].

Если время продления ресурса (9) больше 5 лет, то выдается заключение о продлении срока службы газопровода, в противном случае проводится техническое диагностирование путем вскрытия шурфов и проведение приборного контроля с оформлением протоколов.

Таблица 2

Значения параметров потока отказов для стальных газопроводов

Values of failure flow parameters for steel gas pipelines

Диаметр/толщина, мм	Параметры потока отказов, 1/(км·год)			
	λ_i^{TP}	λ_i^{K1}	λ_i^{K2}	λ_i^{K3}
57/3	0,00050	0,00005	0,00010	0,00025
76/3,5	0,00057	0,00006	0,00011	0,00029
89/3	0,00078	0,00008	0,00016	0,00039
108/3,5	0,00081	0,00008	0,00016	0,00041
114/3,5	0,00086	0,00009	0,00017	0,00043
133/3,5	0,00100	0,00010	0,00020	0,00050
159/4	0,00105	0,00010	0,00021	0,00052
219/4	0,00144	0,00014	0,00029	0,00072
273/4	0,00180	0,00018	0,00036	0,00090
325/4,5	0,00190	0,00019	0,00038	0,00095
377/5,5	0,00180	0,00018	0,00036	0,00090
426/5	0,00224	0,00022	0,00045	0,00112
530/5,5	0,00254	0,00025	0,00051	0,00127
630/9	0,00184	0,00018	0,00037	0,00092

Методика апробирована и внедрена в УП «МИНГАЗ». С 2022 г. по настоящее время с применением данного подхода продиагностировано более 400 км стальных подземных газопроводов. Для наглядности ее применения ниже представлены результаты исследования газопровода 1969 г. постройки в г. Минске на участке по ул. Авакяна от дома 28 до дома 30, корпус 1 [29].

Характеристики объекта согласно проектной документации и схеме размещения объекта:

- год постройки и ввода в эксплуатацию: 1969-й;
- общая протяженность: 372, 85 м;
- диаметр, толщина стенки, мм (длина участка, м): 57×3,5 (100,55), 159×5 (82,40), 325×9 (189,9);
- рабочее давление: 0,0005 МПа;
- тип защитного покрытия – весьма усиленное, материал – стеклоткань, конструкция – битумно-мастичная.

Исходные данные для расчета (табл. 2) взяты из исполнительной и эксплуатационной документации.

Результаты расчета представлены в табл. 3. Так как выделенный для диагностирования участок газопровода состоит из труб разных диаметров, значения параметров потока отказов определяются для каждого диаметра отдельно.

Результаты расчета по выделенным участкам газопровода показали, что надежность газопровода $P(t)$, согласно (5), составила 0,989, что превышает плановую. Время продления ресурса по плановой надежности по (8) со-

ставило 8,07 года, то есть выше минимального продленного срока безопасной эксплуатации газопровода (5 лет). Исходя из полученных результатов исследования технического состояния стальных подземных газопроводов принимается решение о продлении эксплуатации или о реконструкции (замене).

Таблица 3

Исходные данные расчета параметров потока отказов, 1/(км·год)
Initial data for calculating the failure flow parameter, 1/(km·year)

Вид повреждения	Значение для диаметра газопровода, мм			Количество повреждений/ расчетное значение для исследуемого участка		
	57 мм	159 мм	325 мм	57 мм	159 мм	325 мм
Утечка газа	0,00043	0,00084	0,00095	0/0	0/0	2/0,0019
Контакт «труба – земля» без коррозии	0,00004	0,00008	0,00009	1/0,00004	1/0,00008	0/0
Коррозия до 30 % толщины стенки	0,00009	0,00017	0,00019	0/0	0/0	0/0
Коррозия более 30 % толщины стенки	0,00021	0,00042	0,00047	0/0	0/0	0/0
Сумма значений для исследуемого участка				0,00004	0,00008	0,00190
Длина исследуемого участка, км				0,10055	0,08240	0,18990
Параметр потока отказов участка газопровода, 1/(км·год)				0,001		
Параметр потока отказов в случае утечки, 1/(км·год)				0,00165		
Параметр формы α для газопроводов, эксплуатируемых в черте населенных пунктов				1,2		

В целях эффективного расходования материальных ресурсов для формирования программы реконструкции стальных газопроводов, получивших по итогам исследования сроки безопасной эксплуатации 5 лет и менее, осуществляется ранжирование с использованием методики приоритизации на основе оценки рисков эксплуатации [31]. Риски отказов газопровода рассчитываются для двух вариантов [31]:

– с продолжением эксплуатации на срок до очередной оценки технического состояния газопровода и проведением при этом технического обслуживания и текущих ремонтов R_1 ;

– с возобновлением эксплуатации после проведения реконструкции газопровода (или его участка) R_2 .

Величину риска отказов на газопроводе R_1 рассчитаем по формуле

$$R_1 = L_{гп} \Delta T_{отс} \sum_{i=1}^I Z_{p_i}^{\text{тп}} \omega_i^{\text{тс}} + y_{ав}^{\Sigma} P_{ав}^{\text{тс}}, \quad (10)$$

где $L_{гп}$ – протяженность газопровода, км; $\Delta T_{отс}$ – продолжительность интервала времени между очередными оценками технического состояния

газопровода, год; $Z_{p_i}^{tp}$ – суммарные затраты на производство работ по техническому обслуживанию и текущему ремонту газопровода при возникновении i -го отказа, руб./отказ; i – вид отказа, обусловленного техническим состоянием газопровода; ω_i^{tc} – прогнозное значение параметра потока i -х отказов на период от текущей до очередной плановой оценки технического состояния газопровода, отказ/(км · год); $Y_{ав}^{\Sigma}$ – интегральный ущерб от аварии, произошедшей в результате возникновения утечки газа из газопровода, руб.; $P_{ав}^{tc}$ – вероятность возникновения аварии в результате утечки газа из газопровода в интервалах между очередными оценками его технического состояния, доли ед.

Величину риска отказов на газопроводе после проведения капитального ремонта (реконструкции) R_2 , руб., оценивают по формуле

$$R_2 = L_{гп} \left[Z_{гд} + \frac{L_{уч}}{L_{гп}} (Z_{пир} k_{пир} + Z_{смп}^{кр}) + \Delta T_{отс} \sum_{i=1}^I Z_{p_i}^{tp} \omega_i^{tc} \right] + Y_{ав}^{\Sigma} P_{ав}^{tc}, \quad (11)$$

где $Z_{гд}$ – удельная стоимость услуг по техническому диагностированию подземного газопровода, руб./км; $L_{уч}$ – протяженность участка (участков) газопровода, на котором (которых) производится его (их) капитальный ремонт (реконструкция), км; $Z_{пир}$ – удельная стоимость проектно-изыскательских работ, руб./км; $k_{пир}$ – договорный коэффициент; $Z_{смп}^{кр}$ – суммарные удельные затраты на строительно-монтажные работы по капитальному ремонту (реконструкции) газопровода, руб./км; $\Delta T_{отс}$ – продолжительность интервала времени между очередными оценками технического состояния газопровода, год; ω_i^{tc} – прогнозное значение параметра потока i -х отказов после проведения капитального ремонта (реконструкции) газопровода, отказ/(км · год); $P_{ав}^{tc}$ – вероятность возникновения аварии в результате утечки газа из газопровода после проведения его капитального ремонта (реконструкции), доли ед.

Соотношение R_1 и R_2 рассчитывается для каждого газопровода. Первоочередному выводу из эксплуатации подлежит газопровод, у которого указанное соотношение больше. По результатам формируется перечень объектов (табл. 4), из которого видно, что в первую очередь требуется реконструкция (замена) газопровода с архивным номером 1-49/1 «Газопровод среднего давления по проспекту Партизанскому от ГРС № 1 до ул. Филатова с ответвлениями к ГРП № 4, 5, 6, 7, 19».

Анализ эффективности применения способов восстановления работоспособности газопроводов. В качестве примера для оценки стоимости затрат на реконструкцию выбран рассмотренный выше газопровод среднего давления по проспекту Партизанскому от ГРС № 1 до ул. Филатова с ответвлениями к ГРП № 4, 5, 6, 7, 19.

Таблица 4

Результаты приоритизации объектов

Results of prioritization of the objects

№ п/п	Архивный номер газопровода	R_1/R_2
1	1-49/1	1,145
2	4-44/14	0,186
3	4-44/16	0,177
4	4-32a/12	0,171
5	1-53/2	0,163
6	3-122/2a	0,148
7	1-61/4	0,141
8	4-111/6	0,141
9	02.10.2001	0,124
10	3-43/3	0,112

Характеристика участков газопровода, подлежащих ремонту:

- год постройки: 1960-й;
- тип изоляции: весьма усиленная, битумно-мастичная, армированная стеклотканью;
- наличие отклонений от действующих ТНПА: нет;
- рабочее давление: 0,3 МПа;
- трубы: 720×9,0; 630×9; 133×4; 108×4; 89×4;
- наличие средств ЭХЗ: СКЗ 393 КЗУ-0,6 АМ GSM, 2002 г., защитный потенциал: от –1,5 до –2,5 В.

По классификации [32] газопровод относится к объектам третьего класса сложности (К-3).

По заказу УП «МИНГАЗ» выполнено исследование способов восстановления работоспособности объектов газораспределительной системы [33], представленных в табл. 5. Рассмотрим краткую характеристику каждого из них.

Строительство газопровода из стальных труб с демонтажом существующего. При данном способе реконструкции строительство газопровода целесообразно осуществлять по существующему следу после проведения демонтажа существующего газопровода. Строительство производится открытым способом с раскрытием траншеи и закрытым способом с использованием существующих футляров через автомобильные дороги и коммуникации, при условии их пригодности для дальнейшей эксплуатации после проведения их телеинспекции. Дополнительно потребуется устройство футляров в местах пересечения с коммуникациями, построенными после ввода газопровода в эксплуатацию согласно требованиям действующих ТНПА (например, пересечение с каналами теплотрассы, каналами ливневой канализации и др.).

Строительство газопровода из стальных труб без демонтажа существующего. Способ приведен условно, так как согласно [34, статья 25, п. 5]

в случае вывода газопровода из эксплуатации необходимо выполнить его демонтаж. Следовательно, в данном способе реконструкции необходимо рассматривать перекладку газопровода по новому следу и демонтаж существующего газопровода с выполнением тампоножа существующих футляров газопровода, проложенных под автомобильными дорогами для исключения их разрушения с последующим восстановлением. Строительство производится открытым способом с раскрытием траншеи и закрытым способом в футляре при пересечении автомобильных дорог и коммуникаций (каналов тепловой сети и ливневой канализации и др.). Монтаж и испытание газопровода необходимо выполнять в строгом соответствии с [35, раздел 9; 8; 36].

Строительство газопровода из полиэтиленовых труб с демонтажом существующего. Ввиду наличия разрешения Госпромнадзора Республики Беларусь на полиэтиленовые фитинги и неразъемные соединения диаметром только до DN400 перекладка газопровода DN600, DN700 на полиэтилен не представляется возможной. Поэтому при рассмотрении данного способа замена газопровода среднего давления от ГРС-1 до ул. Филатова DN700, DN600 выполняется на стальной газопровод, проложенный по существующему следу. Ответвления к ГРП № 4, 5, 6, 7, 19 заменяются на полиэтиленовый газопровод, проложенный по существующему следу. Монтаж и испытание газопровода следует выполнять в строгом соответствии с [8, 35, 36].

Строительство газопровода из полиэтиленовых труб без демонтажа существующего. Следует учитывать, что способ условный, так как согласно [34, статья 25 п. 5] в случае вывода газопровода из эксплуатации необходимо выполнить его демонтаж. При рассмотрении данного способа замена газопровода среднего давления от ГРС-1 до ул. Филатова DN700, DN600 выполняется на стальной газопровод, проложенный по новому следу с демонтажом существующего газопровода DN600, DN700. Ответвления к ГРП № 4, 5, 6, 7, 19 заменяются на полиэтиленовый газопровод, проложенный по существующему следу.

Перевод газопровода на повышенную категорию давления с заменой сварных соединений. Для перевода газопровода на повышенную категорию давления необходимо соблюсти требования не только прочностные к самому трубопроводу и сварным соединениям, но также и к нормативным расстояниям до зданий, сооружений, коммуникаций от газопровода, которые для газопровода повышенной категории давления соответственно увеличиваются. Кроме того, помимо основного газопровода давление будет повышено и во всех его ответвлениях, что приведет к необходимости установки на каждое ответвление ГРП для соответствующего понижения давления.

Протяжка полиэтиленовых труб в стальные. Протяжка полиэтиленовых труб в стальные – один из методов санации трубопровода (бестраншейной реконструкции). Технология реконструкции заключается в протягивании внутри стальных трубопроводов подготовленных плетей из поли-

этиленовых труб меньшего диаметра. Процесс протяжки состоит из таких этапов, как: раскопка котлованов, подготовка плетей газопровода требуемой длины; очистка полости санируемого газопровода; протаскивание контрольного отрезка полиэтиленовой трубы длиной 2–3 м; протаскивание плети полиэтиленового газопровода, их присоединение; засыпка котлованов. Из-за отсутствия возможности применения полиэтиленовых трубопроводов более DN400 (отсутствие неразъемных соединений и др.), а также невозможности уменьшения диаметра газопровода среднего давления от ГРС-1 до ул. Филатова DN600, DN700, согласно поверочному гидравлическому расчету схемы г. Минска, метод протяжки полиэтиленовых труб в стальные рассмотрен только для ответвлений к ГРП № 4, 5, 6, 7, 19.

Санация газопровода путем протягивания полимерного рукава в полость существующей трубы. Для реконструкции газопровода среднего давления методом санации рассмотрено применение системы Protector Line, основанной на использовании специального самонесущего трехслойного ремонтного рукава. Отличается простотой монтажа в любых климатических условиях, отсутствием практических ограничений к применению и имеет возможность ремонта непрерывных длинномерных участков с прохождением поворотов до 45 градусов при любом радиусе изгиба. Монтаж и испытание газопровода выполняются в строгом соответствии с [8, 35].

Таким образом, реализация каждого способа реконструкции различается не только технологией выполнения работ, но и видами применяемых материалов, их стоимостью, применяемыми механизмами и оборудованием. Сравнительная стоимость реализации реконструкции газопровода описанными выше способами дана в табл. 5, из которой следует, что для данного объекта наиболее выгодным с точки зрения затрат является строительство газопровода из стальных труб с демонтажом существующего.

Таблица 5

Стоимость видов реконструкций газопровода
Cost of types of gas pipeline reconstructions

Вид реконструкции	Стоимость, тыс. руб.
Строительство газопровода из стальных труб с демонтажом существующего	10 113,61
Строительство газопровода из полиэтиленовых труб с демонтажом существующего	11450,327
Замена газопровода методом разрушения	11574,257
Протяжка полиэтиленовых труб в стальные	16 615,77
Строительство газопровода из полиэтиленовых труб без демонтажа существующего	17805,069
Строительство газопровода из стальных труб без демонтажа существующего	22259,654
Санация газопровода	37 929,54
Перевод газопровода на повышенную категорию давления с заменой сварных соединений	Невозможен

Таким образом, существует и на практике применяется большое число технологий восстановления работоспособности газопроводов, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки. Выбор наиболее рациональной зависит от особенностей самого газопровода, местности, имеющейся инфраструктуры, где он проложен, и ряда сопутствующих факторов. Поэтому для каждого конкретного случая восстановления работоспособности газопровода требуется проведение технико-экономического обоснования.

ВЫВОДЫ

1. Интенсификация процесса старения газораспределительной системы Республики Беларусь делает актуальной проблему оценки остаточного ресурса трубопроводов и определения рациональных подходов к восстановлению их работоспособности. Для оценки остаточного ресурса газопроводов необходимо знать степень деградации в период эксплуатации основных их элементов (стальной трубы, сварных соединений, защитного изоляционного покрытия). Сложность решения задачи на практике требует проведения специальных исследований с целью развития методов технического диагностирования состояния газопроводов и анализа эффективности методов восстановления их работоспособности.

2. Установлено, что при сохранении свойств защитного изоляционного покрытия трубопроводов признаки старения стальной части труб не проявляются. Анализ результатов испытаний механических свойств стальных труб с различными сроками службы показал, что условия эксплуатации объектов газораспределительной системы не приводят к их деградации. Механические свойства, структура и химический состав соответствуют требованиям, предъявляемым к конструкционным низкоуглеродистым сталям.

Доказано, что метод измерения переходного электрического сопротивления защитного битумного покрытия в полевых условиях не может быть рекомендован как основной рабочий инструментарий для оценки состояния защитного битумного покрытия. На основании полученных данных лабораторного эксперимента определена фактическая постоянная времени старения битумно-мастичного защитного покрытия, которая составляет $\alpha_{\phi} = 0,0214 \text{ года}^{-1}$. При данной постоянной времени старения срок службы изоляционного покрытия газопроводов в отсутствие механических и прочих силовых воздействий превышает 200 лет.

Предложено для оценки состояния защитных битумных покрытий подземных газопроводов и расчета прогнозирования срока их эксплуатации использовать метод определения долговечности изоляционных покрытий по энергии активации термоокислительной деструкции. Установлены математические зависимости, описывающие взаимосвязь между энергией активации термоокислительной деструкции битумных покрытий и их долговечности (остаточного ресурса).

3. Показано, что применяемый газоснабжающими организациями балльный метод оценки технического состояния подземных газопроводов, выработавших нормативный срок службы, не предполагает определения параметров предельного состояния объекта, что, в свою очередь, не позволяет установить его предельный срок службы. Разработан и предложен к применению метод, основанный на определении параметра потока отказов, учитывающего группу основных эксплуатационных факторов, фиксируемых на протяжении всего жизненного цикла объекта, позволяющий с заданным уровнем надежности определить сроки следующего технического диагностирования. Для формирования ранжированного перечня газопроводов, попадающих под реконструкцию или вывод из эксплуатации, предложена методика приоритизации посредством расчета интегрального критерия состояния, представляющего собой сумму критериев, отражающих уровень надежности и безопасности объекта.

4. Дано краткое описание методов восстановления работоспособности газопроводов (реконструкции, санации, реновации) на конкретном примере. Отмечено значительное отличие способов восстановления работоспособности объектов газораспределительной системы не только технологией выполнения работ, но и видами применяемых материалов, стоимостью привлекаемого оборудования и требуемых механизмов, что не позволяет отдать предпочтение определенному методу ремонта и требует проведения технико-экономического обоснования для каждого конкретного случая восстановления работоспособности газопровода. Для рассмотренного объекта наиболее приемлемым оказалось строительство нового газопровода из стальных труб с демонтажом существующего.

ЛИТЕРАТУРА

1. Седнин, В. А. Анализ и параметрическая оптимизация энерготехнологических установок на базе силового оборудования компрессорных станций магистральных газопроводов / В. А. Седнин, А. А. Абразовский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 6. С. 571–583. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-6-571-583.
2. Анализ фактического состояния предизолированных трубопроводов систем централизованного теплоснабжения после эксплуатации / В. А. Седнин [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 6. С. 544–557. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-544-557>.
3. Программа комплексной модернизации производств газовой сферы на 2021–2025 г. // Министерство энергетики Республики Беларусь. URL: <http://minenergo.gov.by/press/glavnye-novosti/utverzhdjena-programma-kompleksnoy-modernizatsii-proizvodstv-gazovoy-sfery-na-2021-2025-gg/>. Дата публ.: 05.01.2025.
4. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету ГОСТ 27751–88. Введ. 01.07.1988. М.: Стандартинформ, 2007. 6 с.
5. Газораспределение и газопотребление: СН 4.03.01–2019. Введ. 23.07.2020. Минск: РУП «Стройтехнорм», 2020. 104 с.
6. Романюк, В. Н. Применяемые изоляционные покрытия распределительных газопроводов в Республике Беларусь и их характеристика / В. Н. Романюк, Н. В. Струцкий // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 4. С. 308–316. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-308-316>.
7. Струцкий, Н. В. Оценка объемов работ по эксплуатационному контролю стальных подземных газопроводов с учетом организационно-логистического фактора / Н. В. Струцкий, В. Н. Романюк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 2. С. 137–151. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-137-151>.

8. Правила по обеспечению промышленной безопасности в области газоснабжения: постановление М-ва по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь, 5 дек. 2022 г., № 66 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22339537p> (дата обращения: 23.12.2024).
9. Трубы металлические. Метод испытания на растяжение: ГОСТ 10006–80. Введ. 01.07.1980. М.: Стандартинформ, 2010. 12 с.
10. Металлы. Методы испытаний на растяжение: ГОСТ 1497–84. Введ. 16.07.84. М.: Стандартинформ, 2008. 26 с.
11. Механические испытания материалов эксплуатируемых газопроводов / А. С. Гаркун, С. И. Дорошко, В. А. Седнин, С. Ф. Гориченко // Інженерія поверхні та реновація виробів: матеріали 21-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 07–11 червня 2021 р., м. Свалява. Київ: АТМ України, 2021. С. 37.
12. Мониторинг технического состояния и анализ причин разрушения элементов газораспределительной системы / С. Ф. Гориченко, В. Е. Шолоник, А. Г. Анисович, А. Р. Баев [и др.] // Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану: Тези допов. наук.-практ. конф. під ред. Ю.М. Посипайка. Київ: Міжнародна Асоціація «Зварювання», 2021. С. 48.
13. Методология экспериментальных исследований и анализа возможных причин разрушения элементов газораспределительной системы / В. Е. Шолоник, С. Ф. Гориченко, А. Г. Анисович [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. 2021. № 2. С. 3–13.
14. Чухнов, Л. А. О возможности продления срока службы труб распределительных газопроводов с учетом изменений их структуры и основных механических свойств / Л. А. Чухнов, А. П. Андриевский, О. П. Штемпель, А. Н. Янушонок // Энергетическая стратегия. 2022. № 4 (88). С. 32–35.
15. Анисович, А. Г. Анализ остаточного ресурса по состоянию металла труб газораспределительной системы города Минска / А. Г. Анисович, М. Л. Хейфец, А. С. Гаркун [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. 2023. № 1. С. 3–11.
16. Structure and Properties of the Pipes of the City Gas Distribution Network after Long-Term Operation / A. G. Anisovich, M. V. Asadchaya, A. R. Baev [et al.] // Russian Metallurgy (Metally). 2023. Vol. 2023. P. 1535–1541. <https://doi.org/10.1134/S0036029523100038>.
17. Анисович, А. Г. Исследование структуры и свойств труб городской газораспределительной системы после длительной эксплуатации / А. Г. Анисович, М. В. Асадчая А. Р. Баев [и др.] // Деформация и разрушение материалов. 2023. № 5. С. 32–39.
18. Анисович, А. Г. Диагностика состояния труб городской газораспределительной системы после их длительной эксплуатации / А. Г. Анисович, А. С. Гаркун, Г. А. Ланцман [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. 2022. № 2. С. 22–29.
19. Струцкий, Н. В. Организация электрохимической защиты стальных подземных трубопроводов от коррозии в газораспределительной отрасли Республики Беларусь / Н. В. Струцкий, В. Н. Романюк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 67, № 3. С. 257–267. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-257-267>.
20. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии: ГОСТ 9.602–2016. Взамен ГОСТ 9.602–1989. Введ. 01.06.2017. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2016. 87 с.
21. Системы газораспределительные. Сети газораспределения. Определение продолжительности эксплуатации стальных наружных газопроводов при проектировании: ГОСТ Р 58094–2018. Введ. 01.10.2018. М.: Технический комитет по стандартизации РФ, 2018. 19 с.
22. Седнин, В. А. Оценка срока службы изоляционного покрытия подземных стальных газопроводов / В. А. Седнин, А. А. Абразовский, С. Ф. Гориченко // Энергетическая стратегия. 2022. № 6. С. 36–39.
23. Методика определения остаточного ресурса изоляционных покрытий подземных трубопроводов: РД 39Р-00147105-025–02. Введ. 01.11.2002. Уфа: ООО «Монография», 2002. 11 с.
24. Изделия полимерные для строительства. Метод определения долговечности по энергии активации термоокислительной деструкции полимерных материалов: СТБ 1333.0–2002. Введ. 01.03.2003 (первые). Минск: М-во архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2002. 8 с.
25. Седнин, В. А. Оценка срока эксплуатации газопровода по энергии активации термоокислительной деструкции изоляционного покрытия / В. А. Седнин, А. А. Абразовский, Н. Р. Прокопчук [и др.] // Энергетическая стратегия. 2021. № 6. С. 45–48.

26. Прокопчук, Н. Р. Исследование ресурса эксплуатации защитных мастичных покрытий подземных газопроводов по энергии активации термоокислительной деструкции / Н. Р. Прокопчук, В. А. Седнин, А. А. Абразовский [и др.] // Энергетическая стратегия. 2024. № 4. С. 58–62.
27. Инструкция по оценке технического состояния подземных газопроводов, выработавших нормативный срок службы: утв. концерном «Белтопгаз» М-ва энергетики Респ. Беларусь 20.05.05. Минск: НПРУП «Белгазтехника», 2005. 180 с.
28. Абразовский, А. А. Метод оценки надежности и остаточного ресурса распределительного стального подземного газопровода по статистическим данным / А. А. Абразовский, А. Я. Савастиенок, С. Ф. Гориченко // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: сб. тез. докл. X Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 8–9 дек. 2022 г. / Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой; редкол.: В. К. Липский (пред.) [и др.]. Новополоцк, 2022. С. 44.
29. Сравнительный анализ методик оценки технического состояния подземных газопроводов / В. А. Седнин, А. А. Абразовский, А. Я. Савастиенок, С. Ф. Гориченко // Энергетическая стратегия. 2024. № 1. С. 33–38.
30. Федотов, А. В. Основы теории надежности и технической диагностики / А. В. Федотов, Н. Г. Скабкин. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. 64 с.
31. Приоритизация подземных стальных газопроводов на основе оценки рисков эксплуатации / В. А. Седнин, А. А. Абразовский, А. Я. Савастиенок, С. Ф. Гориченко // Энергетическая стратегия. 2022. № 5. С. 41–45.
32. Объекты строительства. Классификация: СН 3.02.07–2020. Введ. 10.06.2021 (впервые). Минск: М-во архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2021. 8 с.
33. Разработка технических решений и определение капитальных затрат на строительство сетей газоснабжения: отчет о НИР (заключ.) / Проектное научно-исследовательское РУП «НИИ Белгипрогаз»; рук. Ю. В. Черота. Минск, 2024. 18 с.
34. Об обращении с отходами: Закон Респ. Беларусь от 20 июля 2007 г. № 271-3 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=h10700271> (дата обращения: 23.12.2024).
35. Газоснабжение: СНиП 3.05.02–88. Введ. 01.07.1988. М.: (ЦИТП) Госстроя СССР, 1988. 56 с.
36. Монтаж наружных газопроводов: СП 4.03.01–2020. Введ. 16.09.2020 (впервые). Минск: РУП «Стройтехнорм», 2020. 41 с.

Поступила 24.12.2024 Подписана в печать 25.02.2025 Опубликована онлайн 31.03.2025

REFERENCES

1. Sednin V. A., Abravovskii A. A. (2017) Analysis and Parametric Optimization of Energy-and-Technology Units on the Basis of the Power Equipment of Compressor Plants of Main Gas Pipelines. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (6), 571–583. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-6-571-583 (in Russian).
2. Sednin V. A., Sednin A. V., Bondarovich A. I., Nekalo I. N., Mukhin A. D. (2024) Analysis of the Actual Condition of Pre-Insulated Pipelines of District Heating Systems After *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (6), 544–557. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-544-557> (in Russian).
3. The Program of Comprehensive Modernization of Gas Production Facilities for 2021–2025 Has Been Approved. *Ministry of Energy of the Republic of Belarus*. 2005. Available at: <https://minenergo.gov.by/press/glavnye-novosti/utverzhdena-programma-kompleksnoy-modernizatsii-proizvodstv-gazovoy-sfery-na-2021-2025-gg/> (in Russian).
4. State standard 27751–88. *Reliability of Constructions and Foundations. Principal Rules of the Calculations*. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 6 (in Russian).
5. SN 4.03.01–2019. *Gas Distribution and Gas Consumption*. Minsk, Stroytekhnorm Publ., 2020. 106 (in Russian).
6. Romaniuk V. N., Strutsky N. V. (2023) Applied Insulating Coatings for Gas Distribution Pipelines in the Republic of Belarus and Their Characteristics. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 22 (4), 308–316. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-308-316> (in Russian).

7. Strutsky N. V., Romaniuk V. N. (2024) Assessment of the Scope of Work for Operational Control of Steel Underground Gas Pipelines, Taking into Account the Organizational and Logistical Factor. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (2), 137–151. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-137-151> (in Russian).
8. Rules for Ensuring Industrial Safety in the Field of Gas Supply: Resolution of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus of 5 December 2022, N 66. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22339537p> (accessed 23 December 2024) (in Russian).
9. State standard 10006-80. *Metal tubes. Tensile test method*. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 12 (in Russian).
10. State standard 1497-84. *Metals. Tensile Testing Methods*. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 22 (in Russian).
11. Garkun A. S., Doroshko S. I., Sednin V. A., Gorichenko S. F. (2021) Mechanical Testing of Materials of Operated Gas Pipelines. *Inzheneriya poverkhni ta renovatsiya virobiv: materialy 21-i Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, 07-11 chervnya 2021 r., m. Svalyava* [Surface Engineering and Product Renovation. Dedicated to the 60th Anniversary of the V. M. Bakul' Institute of Superhard Materials of NAS of the Ukraine. Proceedings of the 21st International Scientific and Technical Conference June 07-11, 2021, Svalyava]. Kiev, 37–39 (in Russian).
12. Gorichenko S. F., Sholonik V. E., Anisovich A. G., Baev A. R., Garkun A. S., Kren' A. P., Kheifets M. L. (2021) Monitoring of the Technical Condition and Analysis of the Causes of Destruction of the Elements of the Gas Distribution System. *Neruinivnii kontrol' ta monitoring tekhnichnogo stanu: Tezi dopov. nauk.-prakt. konf. pid red. Yu.M. Posipaika* [Nondestructive Testing and Monitoring of Technical Condition: Abstracts of the Presentations at the Scientific-and-Practical Conference Edited by Yu. M. Posypayko]. Kiev: International Association “Welding”, 48 (in Russian).
13. Sholonik V. E., Gorichenko S. F., Anisovich A. G., Garkun A. S., Kren' A. P., Asadchaya M. V., Mayorov A. L., Baev A. R., Burmos A. U., Sednin V. A., Doroshko S. I. (2021) Methodology of Experimental Research and Analysis of Possible Causes of Destroying Elements of the Gas Distribution System. *Nerazrushayushchii Kontrol' i Diagnostika = Nondestructive Testing and Diagnostics*, (2), 3–13 (in Russian).
14. Chukhnov L. A., Andrievskii A. P., Shtempel' O. P., Yanushonok A. N. (2022) On the Possibility of Extending the Service Life of Gas Distribution Pipes, Taking into Account Changes in Their Structure and Basic Mechanical Properties. *Energeticheskaya Strategiya* [Energy Strategy], (4), 32–35 (in Russian).
15. Anisovich A. G., Kheifets M. L., Garkun A. S. [et al.] (2023) Analysis of the Residual Resource According to the State of the Metal Pipes of the Gas Distribution System of the City of Minsk. *Nerazrushayushchii Kontrol' i Diagnostika = Nondestructive Testing and Diagnostics*, (1), 3–11 (in Russian).
16. Anisovich A. G., Asadchaya M. V., Baev A. R., Garkun A. S., Kren' A. P., Kheifetz M. L. (2023) Structure and Properties of the Pipes of the City Gas Distribution Network after Long-Term Operation *Russian Metallurgy (Metally)*, 2023 (10), 1535–1541. <https://doi.org/10.1134/S003602952310003/>
17. Anisovich A. G., Asadchaya M. V., Baev A. R., Garkun A. S., Kren' A. P., Gorichenko S. F. (2023) Investigation of the Structure and Properties of Pipes of the Urban Gas Distribution System After Long-Term Operation. *Deformatsiya i Razrushenie Materialov* [Deformation and Fracture of Materials], (5), 32–39 (in Russian).
18. Anisovich A. G., Garkun A. S., Lantsman G. A., Gorichenko S. F., Doroshko S. I., Sednin V. A., Abrazovsky A. A. (2022) Control and Diagnostics of Products and Structural Materials. *Nerazrushayushchii kontrol' i diagnostika = Nondestructive Testing and Diagnostics*, (2), 22–29 (in Russian).
19. 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).

20. State standard 9.602–2016. *Unified Corrosion and Aging Protection System. Underground Structures. General Requirements for Corrosion Protection*. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 87 (in Russian).
21. State standard R 58094-2018. *Gas Distribution Systems. Gas Distribution Networks. Determination of the Duration of Operation of Steel External Gas Pipelines in the Design*. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 19 (in Russian).
22. Sednin V. A., Abrazovskii A. A., Gorichenko S. F. (2022) Evaluation of the Service Life of the Insulating Coating of Underground Steel Gas Pipelines. *Energeticheskaya Strategiya* [Energy Strategy], (6), 36–39 (in Russian).
23. RD 39R-00147105-025–02. *Methodology for Determining the Residual Life of Insulation Coatings of Underground Pipelines*. Ufa, Publishing House for Scientific and Technical Literature “Monograph”, 2002. 11 (in Russian).
24. Standard of the Republic of Belarus STB 1333.0–2002. *Polymer Products for Construction. Method for Determining Durability by the Activation Energy of Thermo-Oxidative Degradation of Polymer Materials*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2002. 8 (in Russian).
25. Sednin V. A., Abrazovskii A. A., Prokopchuk N. R., Garkun, A. S., Gorichenko S. F. (2021) Estimation of the Service Life of the Gas Pipeline by the Activation Energy of the Thermal Oxidative Degradation of the Insulation Coating. *Energeticheskaya Strategiya* [Energy Strategy], (6), 45–48 (in Russian).
26. Prokopchuk N.R., Sednin V. A., Abrazovskii A. A., Strutsky N. V., Gorichenko S. F. Investigation of the Service Life of Protective Mastic Coatings of Underground Gas Pipelines Based on the Activation Energy of Thermal Oxidative Degradation. *Energeticheskaya Strategiya* [Energy Strategy], (4), 58–62 (in Russian).
27. *Instructions for Assessing the Technical Condition of Underground Gas Pipelines that Have Reached their Standard Service Life: Approved by the “Beltopgaz” Concern of the Ministry of Energy of the Republic of Belarus*, 20.05.2005. Minsk: SIRUE “Belgaztekhnik”, 2005. 180 (in Russian).
28. Abrazovsky A. A., Savastienok A. Ya., Gorichenko S. F. (2022) Method of Assessing Reliability and Residual Resource of a Distribution Steel Underground Gas Pipeline Based on Statistical Data. *Nadezhnost' i bezopasnost' magistral'nogo truboprovodnogo transporta: sb. tez. dokl. Kh Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Novopolotsk, 8–9 dekabrya 2022 g.* [Reliability and Safety of Trunk Pipeline Transport: Collection of Abstracts of the Xth International Scientific and Technical Conference, Novopolotsk, December 8–9, 2022]. Novopolotsk, Polotsk State University Named after Euphrosyne of Polotsk, 44–46 (in Russian).
29. Sednin V. A., Abrazovskii A. A., Savastienok A. Ya., Gorichenko S. F. (2024) Comparative Analysis of Methods for Assessing the Technical Condition of Underground Gas Pipelines; *Energeticheskaya Strategiya* [Energy Strategy], (1), 33–37 (in Russian).
30. Fedotov A.V., Skabkin N. G. (2010) *Fundamentals of Reliability Theory and Technical Diagnostics*. Omsk, OmSTU Publishing House. 64 (in Russian).
31. Sednin V. A., Abrazovskii A. A., Savastienok A. Ya., Gorichenko S. F. (2022) Prioritization of Underground Steel Gas Pipelines Based on Operational Risk Assessment. *Energeticheskaya Strategiya* [Energy Strategy], (5), 41–45 (in Russian).
32. SN 3.02.07–2020. *Construction Sites. Classification*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2021. 7 (in Russian).
33. Cherota Yu. V. (2024) Development of Technical Solutions and Determination of Capital Costs for the Construction of Gas Supply Networks: a Research Report (Final). Minsk, Design Research RUE “NII Belgiprotopgaz”, 18 (in Russian).
34. The Law of the Republic of Belarus of July 20, 2007, No 271-3 On Waste Management. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=h10700271> (accessed 23 December 2024) (in Russian).
35. SNiP 3.05.02-88. *Gas Supply*. Moscow, CISD of the Gosstroy of the USSR, 1988. 54 (in Russian).
36. Building Regulations of the Republic of Belarus SP 4.03.01-2020. *Installation of Outdoor Gas Pipelines*. Minsk, 2020, Stroitekhnorm, 36 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-175-188>

УДК 621.22-253

Оценка влияния изменения давления в проточной части на биологическую безопасность осевой гидротурбины при увеличении толщины лопасти рабочего колеса

**М. А. Бирюлин¹, А. В. Волков¹, А. А. Дружинин¹, В. Н. Шарий¹,
И. В. Качанов², Г. М. Бровка²**

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ» (Москва, Российская Федерация),

²Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Рассматриваются вопросы повышения экологической безопасности энергообъектов, в частности малых ГЭС, которые позволяют эффективно использовать местные энергоресурсы, в том числе для удаленных и автономных потребителей. С увеличением числа малых гидроэлектростанций в мире возникает потребность в обеспечении их биологической безопасности с целью снижения влияния на биосреду водоемов. В настоящее время предложен ряд технических решений, в частности для рабочих колес гидротурбин, позволяющих снизить возможные негативные последствия для экологии. Однако данные предложения в основном направлены на борьбу с физическим воздействием при столкновении с лопастью, а вопросы, связанные с энергоэффективностью и другими видами негативных воздействий, например баротравмы, остаются открытыми. В данной статье рассматривается влияние толщины лопасти на эффективность и биологическую безопасность при воздействии перепада давления. Для исследования было создано и испытано рабочее колесо осевой гидротурбины. С помощью CFD и методики BioPA определены зависимости выживаемости от различных толщин лопасти, получена зависимость КПД гидротурбины от выживаемости, рассчитанной по перепаду давлений, при различных толщинах лопасти. Полученные результаты показывают важность создания биологически безопасных рабочих колес гидротурбин с учетом различных показателей качества для получения как эффективных, так и безопасных решений.

Ключевые слова: гидравлические гидротурбины, биологически безопасные гидротурбины, CFD-моделирование, перепады давления

Для цитирования: Оценка влияния изменения давления в проточной части на биологическую безопасность осевой гидротурбины при увеличении толщины лопасти рабочего колеса / М. А. Бирюлин [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 2. С. 175–188. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-175-188>

Адрес для переписки

Качанов Игорь Владимирович
Белорусский национальный
технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 249-56-77
hidrokaf@bntu.by

Address for correspondence

Kachanov Igor V.
Belarusian National
Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 249-56-77
hidrokaf@bntu.by

Assessment of the Impact of Pressure Changes in the Flow Path on the Biological Safety of an Axial Hydraulic Turbine with Increasing Thickness of the Impeller Blade

М. А. Бирюлин¹⁾, А. В. Волков¹⁾, А. А. Дружинин¹⁾, В. Н. Шарий¹⁾,
И. В. Качанов²⁾, Г. М. Бровка²⁾

¹⁾NRU Moscow Power Engineering Institute (Moscow, Russian Federation),

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

Abstract. The issues of improving the environmental safety of energy facilities, in particular small hydroelectric power plants, which make it possible to effectively use local energy resources, including the ones for remote and autonomous consumers, are considered. With the increasing number of small hydroelectric power plants in the world, there is a need to ensure their biological safety in order to reduce the impact on the biological environment of reservoirs. Currently, a number of technical solutions are available, in particular for impellers of hydraulic turbines, which allow reducing possible negative consequences for the environment. However, these proposals are mainly aimed at combating the physical impact of a collision with the mouth, while matters related to energy efficiency and other types of negative impacts, such as barotrauma, remain open. The present article examines the effect of blade thickness on efficiency and biosafety when exposed to a pressure drop. The impeller of an axial hydraulic turbine was created and tested for the study. With the help of CFD and the BioPA technique, the dependences of survivability on different blade thicknesses were determined, and the dependence of the efficiency of a hydraulic turbine on survivability, calculated from the pressure drop, at different blade thicknesses was obtained. The obtained results show the importance of creating biologically safe impellers of hydraulic turbines, taking into account various quality indicators, in order to obtain both effective and safe solutions.

Keywords: hydroturbines, fish-friendly hydroturbines, CFD-simulation, pressure difference

For citation: Biriulin M. A., Volkov A. V., Druzhinin A. A., Shary V. N., Kachanov I. V., Brovka G. M. (2025) Assessment of the Impact of Pressure Changes in the Flow Path on the Biological Safety of an Axial Hydraulic Turbine with Increasing Thickness of the Impeller Blade. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (2), 175–188. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-175-188> (in Russian)

Введение

В результате активного гидротехнического строительства по всему миру появляется множество гидроэлектростанций различных мощностей. В настоящее время очень популярна малая гидроэнергетика благодаря низким капитальным затратам на строительство и возможности обеспечивать энергоснабжение в труднодоступных и изолированных районах. Для того чтобы не наносить вреда природе, который проявляется в ущербе рыбному хозяйству и снижении биологических процессов, связанных с самоочищением водных масс, требуется уделять большое внимание вопросам экологических последствий при эксплуатации ГЭС.

В настоящее время эксплуатирующие организации вынуждены оплачивать штрафы за урон, наносимый биосреде, а заводы – изготовители гидравлических турбин озабочены биобезопасностью при проектировании новых агрегатов. Над проблемами экологической безопасности активно работают во всем мире специалисты в области гидроэнергетики, в частности в США, Австрии, Германии, Китае, Индии и др. Поскольку на территориях РФ и Беларуси располагается множество каскадов ГЭС, возникает потребность в аналогичных собственных разработках, исследованиях и импортозамещающих технологиях, направленных на снижение негативного механического воздействия на биоресурсы рек.

Так, в работах [1, 2] рассматривался механизм травмирования рыб в проточной части гидротурбин, а также наиболее известные подходы для повышения биобезопасности. Среди них можно выделить подходы, касающиеся конструктивных изменений в рабочем колесе гидротурбины:

- устранение зазоров между лопастями и рабочим колесом;
- уменьшение количества лопастей;
- увеличение длины лопасти;
- увеличение толщины лопасти.

Также стоит отметить решение исследователей из Natal Energy. Они дополнительно модифицировали лопасть, которая позволяет рыбам испытывать меньшее воздействие от удара на периферии лопасти [3].

Тем не менее все предложения направлены в первую очередь на борьбу с физическим воздействием при столкновении с лопастью, а вопросы, связанные с баротравмами, после внедрения предложенных решений остаются открытыми. Кроме того, любое вмешательство в отлаженные заводами-изготовителями методики проектирования рабочих колес приводит к изменению их КПД. К примеру, в статье [2] показано влияние изменения формы втулки рабочего колеса с целью устранения зазоров на энергоэффективность. Но то, как будет изменяться эффективность рабочих колес после реконструкции, до конца не изучено.

Одним из наиболее популярных методов повышения биобезопасности считается увеличение толщины лопасти, так как это значительно снижает травматизм рыб. В связи с этим в статье показано исследование влияния изменения толщины лопасти рабочего колеса осевой гидротурбины на эффективность и выживаемость при воздействии давления.

Механизм воздействия давления на рыб

На ГЭС в области от водовода до направляющего аппарата происходит повышение давления, которое впоследствии срабатывает на рабочем колесе гидротурбины. На рис. 1 можно видеть осциллограмму давления, снятую в работе [4].

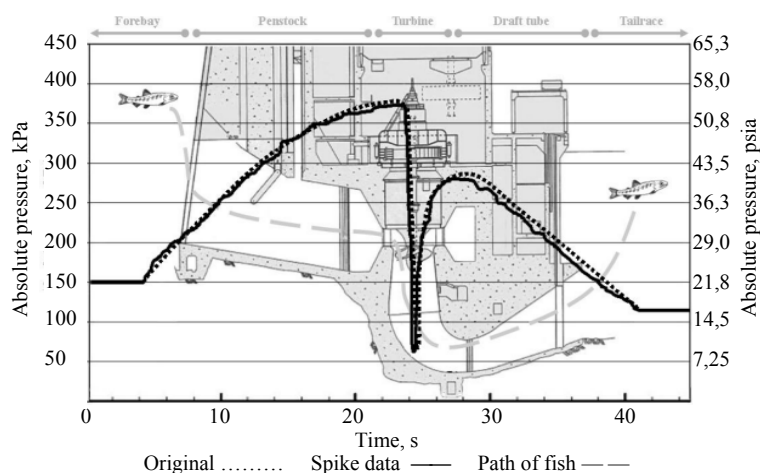


Рис. 1. Осциллограмма давления, снятая внутри проточной части гидроагрегата

Fig. 1. Pressure oscillogram taken inside the flow path of a hydraulic turbine

Таким образом, рыба может испытывать на себе перепад давления, который приведет к баротравме. В [4] отмечается, что важным значением, с точки зрения выживаемости рыбы, является минимальное давление, которое находится в районе 0,25 с, так как более ранние исследования [5, 6] установили, что повышение давления слабо влияет на плавательную способность управлять своим движением. Минимумы давления располагаются под лопастью гидротурбины или в вихревом жгуте, образующемся под втулкой турбины [7–12]. Кроме того, в случаях локального падения давления до уровня насыщенного пара может возникнуть более тяжелый случай баротравмы, вызываемой кавитацией. В результате данного явления образуются паровые полости (пузырьки), которые разрушаются в области с более высоким давлением. Схлопывание кавитационных пузырей часто вызывает шум, вибрацию, эрозионное повреждение твердых поверхностей, потерю эффективности [13–16]. Аналогичное воздействие оказывается и на рыбу, что приводит к физическим повреждениям тела [17].

Величина повреждений, вызываемых давлением, также зависит от скорости изменения давления и вида рыбы. Открытопузырные рыбы, такие как лосось и форель, имеют воздушный канал, соединяющий плавательный пузырь с пищеводом, который используется вместе со ртом для быстрого всасывания или выпуска газа [18], что позволяет быстро адаптироваться к изменению давления.

У закрытопузырных рыб, таких как окунь и бас, нет воздушного канала, и они должны регулировать содержание газов в своем организме с помощью диффузии в крови. Поскольку этот процесс может занимать несколько часов, эти рыбы более восприимчивы к повреждениям из-за быстрого снижения давления.

Методика оценки выживаемость рыб при воздействии давления

Оценить вероятность летальной травмы от баротравмы можно с помощью методики, описанной в статье [19].

На основе лабораторных исследований выведена эмпирическая зависимость вероятности летального ранения $P_{\text{лет}}$

$$P_{\text{лет}} = \frac{e^{-5,56+3,85 \cdot LRP_i}}{1 + e^{-5,56+3,85 \cdot LRP_i}}, \quad (1)$$

где LRP_i – натуральный логарифм коэффициента изменения давления.

Данный коэффициент рассчитывается по выражению

$$LRP_i = \ln \left(\frac{P_a}{P_{\text{min}}} \right), \quad (2)$$

где p_a – давление, к которому приспособилась рыба до попадания в проточную часть; p_{min} – минимальное давление, возникающее в проточной части.

CFD-моделирование позволяет получить линии тока и определить минимальное давление, соответствующее каждой линии. С учетом равновероятного попадания рыбы на каждую из полученных линий тока строится

гистограмма по ряду интервалов давления для расчета вероятности воздействия определенного p_{min} на рыбу.

Зависимости, описывающие вероятность воздействия определенного давления на рыбу и вероятность летального ранения, показаны на рис. 2. Заштрихованная площадь показывает ожидаемую вероятность летальной травмы в заданной рабочей точке гидротурбины.

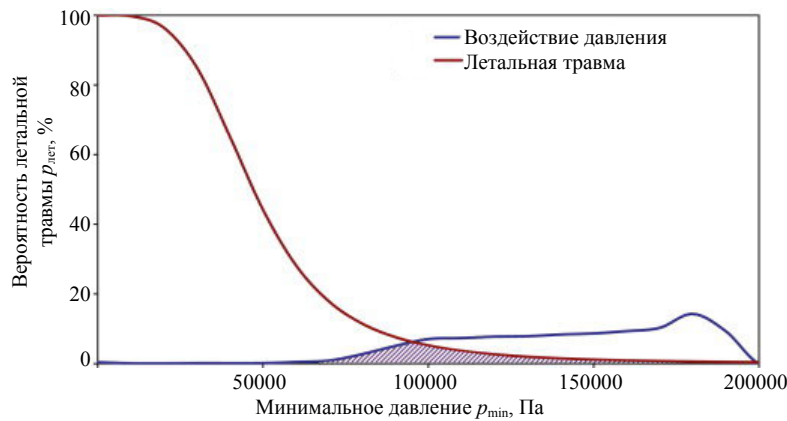


Рис. 2. Ожидаемая вероятность летальной травмы

Fig. 2. Expected mortal injury

Таким образом, общий риск летальной травмы во время прохождения через проточную часть возможно оценить с помощью показателя эффективности β

$$\beta = \left(\sum_{i=1}^N P_{лет,i} \cdot P(p_{min})_i \right) \cdot 100 \% \quad (3)$$

Расчетные и экспериментальные исследования

Для анализа влияния геометрических параметров проточной части на биосреду были созданы рабочие колеса в исходном и модифицированном состояниях. Анализ вероятной летальности рыб осуществлялся по методике [19]. Исходное рабочее колесо осевой гидротурбины было спроектировано на параметры, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры рабочего колеса
 Impeller parametrs

Параметр Parameter	Значение Value	Ед. units
1	2	3
Номинальный диаметр D_1 Nominal diameter D_1	0,200	м m
Втулочное отношение (0,3–0,6) Hub ratio (0,3–0,6)	0,450	

Окончание табл. 1
 Ending Tabl. 1

1	2	3
Расход Q Flowrate Q	0,130	$\text{м}^3/\text{с}$ m^3/s
Напор H Head H	4,000	м
Частота вращения n Rotation speed n	1500,000	rev/min
Число лопастей Z Number of blades Z	4,000	шт./ units
Диаметр втулки $d_{\text{вт}}$ Hub diameter $d_{\text{вт}}$	0,090	м m
Гидравлический КПД Hydraulic efficiency	0,920	
Густота решетки на средней поверхности тока L/t Lattice density on the middle flowpath L/t	1,0	

После подготовки CAD-модели рабочего колеса она была импортирована в программный пакет FlowVision в формате STL для проведения численного эксперимента. Импортированная геометрия продемонстрирована на рис. 3.

Для расчетной области в качестве граничных условий задавалось полное давление на входе $p_1 = 50$ кПа и расход на выходе $Q = 0,13$ $\text{м}^3/\text{с}$. Турбулентное течение рабочей среды моделировалось с использованием $k-\epsilon$ модели турбулентности. В табл. 2 показано исследование сеточной сходимости.

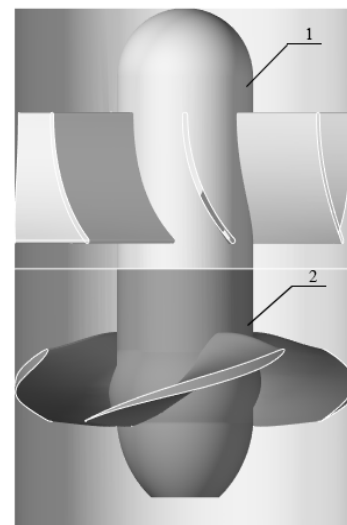


Рис. 3. Отображение модели рабочего колеса в программе FlowVision: 1 – направляющий аппарат, обеспечивающий нужную циркуляцию; 2 – рабочее колесо

Fig. 3. Impeller model in the FlowVision program: 1 – guide vane, providing the necessary circulation; 2 – runner

Как видно из табл. 2, с ростом количества ячеек в определенный момент разница моментов исчезает, дальнейшее дробление сетки не меняет эффект. Таким образом, в качестве принятого значения был выбран вариант 3. Общее количество элементов в построенной расчетной сетке составило 1,96 млн.

На рис. 4 показан поперечный разрез расчетной сетки, на котором продемонстрирован размер ячеек и локальное сгущение сеточных слоев у стенок.

Таблица 2

Исследование сеточной независимости
 Mesh sensitivity test

Вар. Var.	Характерный размер орта, мм Characteristic unit size, mm	Ячейки, ед. Cells, units	Ячейки с учетом адаптации, ед. Cells taking into account adaptation, units	Момент на лопастях РК, Н · м The torque on the runner blades, N · m
1	4	208877	463744	22,57
2	3	505296	760163	27,33
3	2	1705374	1960241	30,98
4	1,5	2122600	2377467	31,05

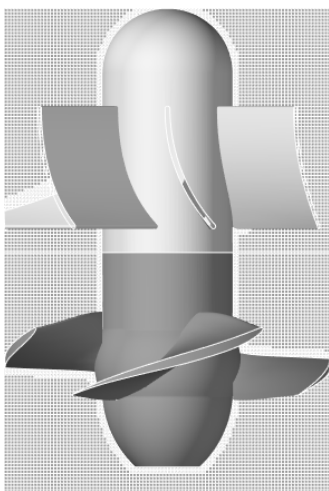


Рис. 4. Разрез расчетной сетки
 Fig. 4. Section
 of the computational mesh

На рис. 5 представлены контуры распределения давления и скоростей для оптимальной точки работы турбины.

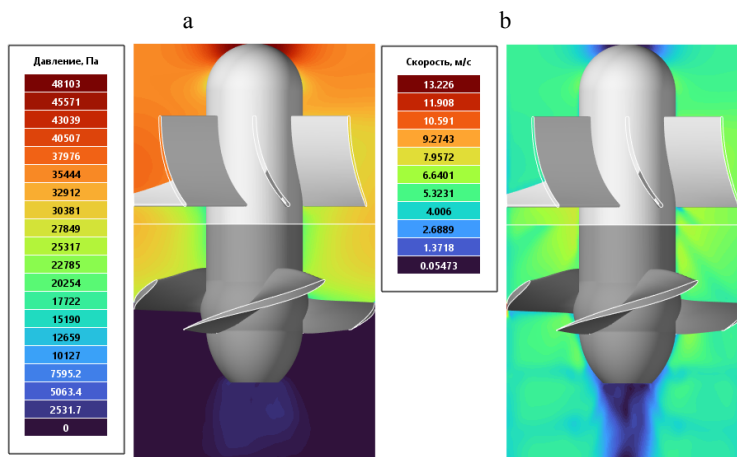


Рис. 5. Результаты расчета рабочего колеса:
 а – контур давлений; б – то же скоростей для оптимальной точки работы турбины

Fig. 5. Calculation results related to the impeller. Distribution of pressure (a)
 and velocity (b) for the energetically optimal operating point

Для верификации расчетных исследований был проведен физический эксперимент на модернизированном энергокавитационном стенде микрогидротурбин кафедры ГТМ НИУ «МЭИ». Принципиальная схема стенда приведена на рис. 6.

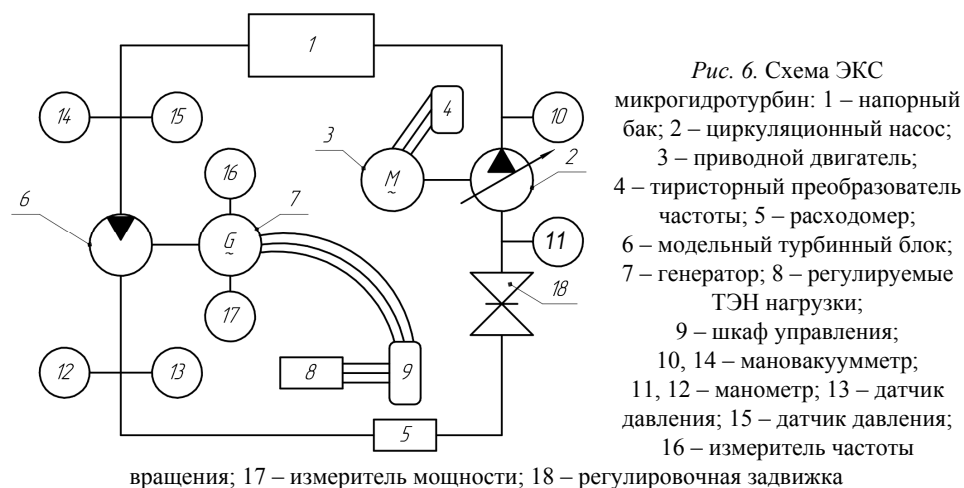


Fig. 6. The scheme of an energy cavitation stand for micro-hydro turbines: 1 – tank; 2 – circulation pump; 3 – drive motor; 4 – thyristor frequency converter; 5 – flow meter; 6 – model turbine block; 7 – generator; 8 – adjustable heating elements loads; 9 – control cabinet; 10, 14 – pressure and vacuum gauge; 11, 12 – pressure gauge; 13 – pressure sensor; 15 – pressure sensor; 16 – rotation speed meter; 17 – power meter, 18 – adjusting valve

Визуализация полученных в ходе физического эксперимента результатов показана на рис. 7, 8.

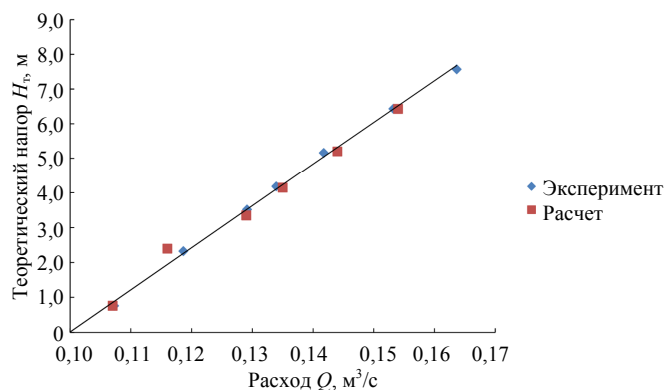


Рис. 7. Зависимости теоретического напора от расхода при расчете и эксперименте
Fig. 7. Curves of theoretical pressure on flow rate in CFD and field experiments

Получение зависимости теоретического напора от расхода в виде линейной зависимости показывает (рис. 7), что условия проведения и обработки результатов эксперимента соответствуют нормам. Сравнение результатов эксперимента и расчета (рис. 8) показывает хорошую сходимость, что позволяет сделать выводы о правомерности использования рас-

пределения скоростей и давлений в проточной части гидротурбин, полученных в расчете для прогнозирования траектории движения биосреды (будет представлено ниже). Таким образом, можно считать, что рассчитанные вероятности получения травм рыбами при прохождении через гидротурбину соответствуют действительности.

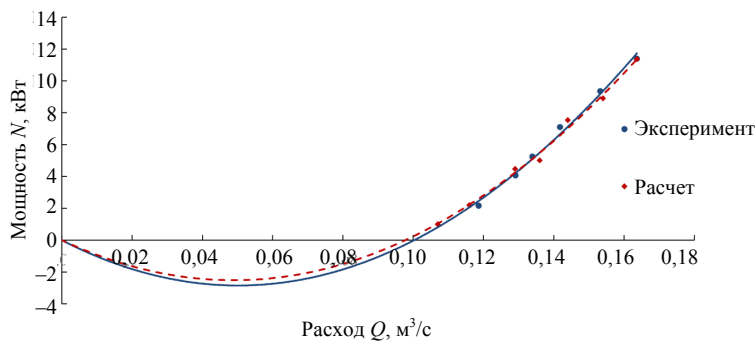


Рис. 8. Зависимости мощности от расхода при расчете и эксперименте

Fig. 8. Curves of power on flow rate in CFD and field experiments

Влияние изменения толщины на эффективность и биобезопасность

Для дальнейших расчетов толщина рабочего колеса была увеличена в 2 и в 3 раза по сравнению с первоначальной.

На основании численного эксперимента получен набор энергетических характеристик и вероятностей выживаемости для лопастных систем различной толщины. Данные сведены на общие диаграммы (рис. 9–11).

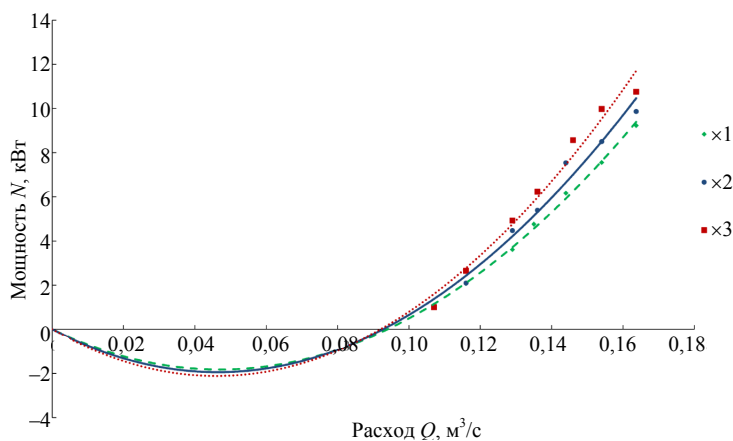


Рис. 9. Зависимости мощности от расхода для трех различных вариантов толщин лопасти

Fig. 9. Dependence of power on flow rate for three different blade thicknesses

Из анализа рис. 9–11 видно, что при увеличении толщины лопасти возрастают мощность и биобезопасность, при этом сокращается рабочая об-

ласть турбины и снижается ее КПД. В связи с этим зависимость показателей эффективности – биобезопасность принимает следующий вид (рис. 12).

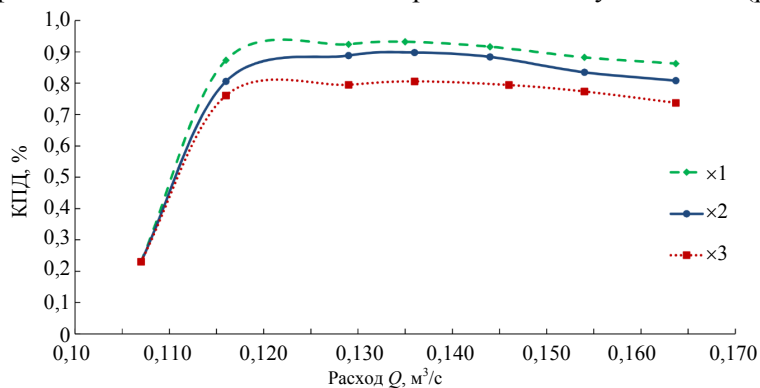


Рис. 10. Зависимости КПД от расхода для трех различных вариантов толщин лопасти
Fig. 10. Dependence of efficiency on flow rate for three different blade thicknesses

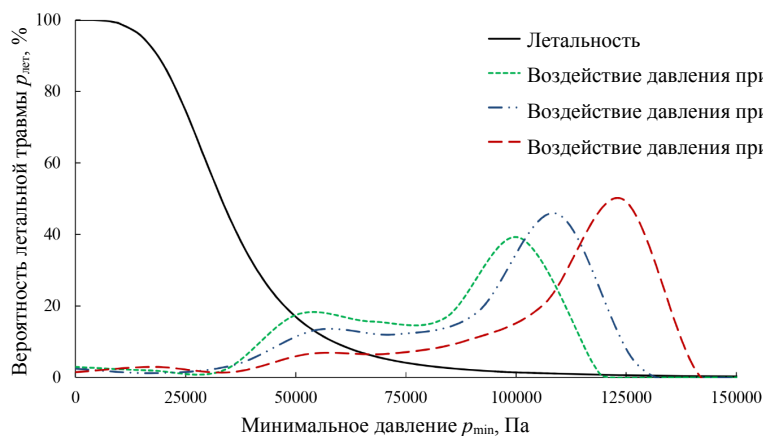


Рис. 11. Вероятность летального исхода для трех различных вариантов толщин лопасти
Fig. 11. Fatal outcome probabilities for three different blade thicknesses

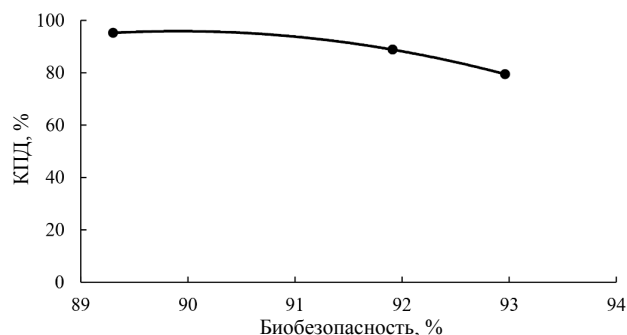


Рис. 12. Зависимость КПД гидротурбины от выживаемости, рассчитанной по перепаду давлений, при различных толщинах лопасти
Fig. 12. Dependence of the efficiency of a hydraulic turbine on the survival rate calculated from the pressure drop at different blade thicknesses

ВЫВОДЫ

1. Ряд исследований, например [3, 20], показывает, что изменение толщины лопасти рабочих колес гидротурбины приводит к повышению выживаемости рыб, так как позволяет рыбам испытывать меньшее воздействие от удара о лопасти. При этом если количество лопастей осталось прежним, происходит стеснение потока, изменяется вырабатываемая мощность и точка с оптимальным КПД смещается. Согласно рис. 11, при обеспечении высокого показателя выживаемости происходит значительное снижение КПД, следовательно, при использовании данного метода целесообразно рассматривать диапазон проектных параметров, при которых минимальны снижение КПД и повышение биобезопасности. Также стоит отметить, что исследования проводились на осесимметричных профилях. Применение асимметричного профиля в дальнейших исследованиях может значительно изменить вид полученной зависимости.

2. Дополнительно следует отметить, что оценка биобезопасности должна учитывать интегральный эффект нескольких негативных воздействий для более реалистичного определения вероятности летального исхода, что позволит достичь максимальной выживаемости рыб еще на этапе проектирования будущих рабочих колес гидротурбин. Перспективно осуществить на основе многокритериальной задачи с использованием нейронных сетей исследования по созданию проточных частей гидротурбин с учетом максимально возможного количества показателей качества и ограничений.

Результаты получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения Государственного задания № FSWF-2022-0008, вступившего в силу в соответствии с Соглашением № 075-03-2022-138/5 от 02.11.2022.

ЛИТЕРАТУРА

1. Koukouvini, Ph. F. State of the Art in Designing Fish-Friendly Turbines: Concepts and Performance Indicators / Ph. F. Koukouvini, J. Anagnostopoulos // *Energies*. 2023. Vol. 16, No 6. P. 2661. <https://doi.org/10.3390/en16062661>.
2. Методы обеспечения биобезопасности элементов проточных частей гидротурбин / А. В. Волков, В. Ю. Ляпин, А. А. Дружинин [и др.] // *Теплоэнергетика*. 2023. № 11. С. 107–114. <https://doi.org/10.56304/S0040363623110127>.
3. Improving Survival: Injury and Mortality of Fish Struck by Blades with Slanted, Blunt Leading Edges / S. V. Amaral, S. M. Watson, A. D. Schneider [et al.] // *Ecohydraulics*. 2020. Vol. 5. P. 175–183. <https://doi.org/10.1080/24705357.2020.1768166>.
4. Assessing Barotrauma in Neutrally and Negatively Buoyant Juvenile Salmonids Exposed to Simulated Hydro-Turbine Passage Using a Mobile Aquatic Barotrauma Laboratory / J. Stephenson, A. J. Gingerich, R. S. Brown [et al.] // *Fish. Res.* 2010. Vol. 106, No 3. P. 271–278. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2010.08.006>.

5. Lampert, W. Experiments on the Resistance of Fish to Rapid Increase in Hydrostatic Pressure / W. Lampert // *Journal of Fish Biology*. 1976. Vol. 8, No 5. P. 381–383. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1976.tb03966.x>.
6. Foye, R. E. Effects of Pressure on Survival of Six Species of Fish / R. E. Foye, M. Scott // *Transactions of the American Fisheries Society*. 1965. Vol. 94, No 1. P. 88–91. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1965\)94\[88:eoposo\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1965)94[88:eoposo]2.0.co;2).
7. Guo, T. Analysis of Channel Vortex and Cavitation Performance of the Francis Turbine under Partial Flow Conditions / T. Guo, J. Zhang, Z. Luo // *Processes*. 2021. Vol. 9, No 8. P. 1385. <https://doi.org/10.3390/pr9081385>.
8. Kumar, P. Study of Cavitation in Hydro Turbines – A Review / P. Kumar, R. P. Saini // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14, No 1. P. 374–383. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.024>.
9. Research on the Vortex Rope Control Techniques in Draft Tube of Francis Turbines / L. Wang, J. Cui, L. Shu [et al.] // *Energies*. 2022. Vol. 15, No 24. P. 9280. <https://doi.org/10.3390/en15249280>.
10. Prediction of Cavitation and Its Mitigation Techniques in Hydraulic Turbines – A Review / Brijkishore, R. Khare, V. Prasad // *Ocean Engineering*. 2021. Vol. 221. P. 108512. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108512>.
11. Оптимизация работы водозаборов подземных вод с помощью двухколонных скважин / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 5. С. 451–462. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-451-462>.
12. Методика гидравлического расчета групповых скважинных водозаборов с парными сборными водоводами / В. В. Веремеинок, В. В. Ивашечкин, В. И. Крицкая // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 3. С. 268–280. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-268-280>.
13. Odeh, M. M. A Computer Expert System for the Analysis and Design of Cavitating Control Valves: Ph.D. Dissertation / M. M. Odeh. Logan, Utah, 1988. 127 p.
14. Tullis, J. P. Fundamentals of Cavitation / J. P. Tullis // *Hydraulics of Pipelines – Pumps, Valves, Cavitation, Transients* / J. P. Tullis. New York John Wiley & Sons, Inc., 1989. Chapter 5. P. 119–133.
15. Математические модели скважинных водозаборов с разветвленной и кольцевой схемами соединения сборных водоводов / В. В. Веремеинок, В. В. Ивашечкин, В. В. Крицкая // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 6. С. 563–580. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-563-580>.
16. Моделирование работы скважинного водозабора подземных вод с кольцевым сборным водоводом / В. В. Веремеинок, В. В. Ивашечкин, В. И. Крицкая // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 3. С. 289–300. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-289-300>.
17. An Experimental Study of Cavitation Damage on Tissue of *Carassius Auratus* in a Jet Fish Pump / X. Long, M. Xu, J. Wang [et al.] // *Ocean Engineering*. 2019. Vol. 174. P. 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.01.052>.
18. Development of Biological Criteria for the Design of Advanced Hydropower Turbines / Glenn F. Cada, Charles C. Coutant. Idaho: US Department of Energy, 1997. URL: <https://www1.eere.energy.gov/wind/pdfs/doewater-10578.pdf>.
19. Quantifying Barotrauma Risk to Juvenile Fish During Hydro-Turbine Passage / M. C. Richmond, J. A. Serkowski, L. L. Ebner [et al.] // *Fisheries Research*. 2014. Vol. 154. P. 152–164. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2014.01.007>.

20. Mortality and Injury Assessment for Three Species of Fish Exposed to Simulated Turbine Blade Strike / M. Bevelhimer, B. M. Pracheil, A. M. Fortner [et al.] // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 2019. Vol. 76, No 12. P. 152–164. <http://doi.org/10.1139/cjfas-2018-0386>.

Поступила 19.08.2024 Подписана в печать 23.10.2024 Опубликовано онлайн 31.03.2025

REFERENCES

1. Koukouvinis Ph. F., Anagnostopoulos J. (2023) State of the Art in Designing Fish-Friendly Turbines: Concepts and Performance Indicators. *Energies*, 16 (6), 2661. <https://doi.org/10.3390/en16062661>.
2. Volkov A. V., Lyapin V. Yu., Druzhinin A. A., Biryulin M. A., Tkach M., Kachanov I. V., Ernan-des P. G. (2023) Methods for Rendering Biosafety of Elements in Flow Paths of Hydraulic Turbines. *Thermal Engineering*, (11), 932–938. <https://doi.org/10.1134/S0040601523110125>.
3. Amaral S. V., Watson S. M., Schneider A. D., Rackovan J., Baumgartner A. (2020). Improv-ing Survival: Injury and Mortality of fish Struck by Blades with Slanted, Blunt Leading Edges. *Journal of Ecohydraulics*, 5 (2), 175–183. <https://doi.org/10.1080/24705357.2020.1768166>.
4. Stephenson J. R., Gingerich A. J., Brown R. S., Pflugrath B. D., Deng Z., Carlson Th. J., Langeslay M. J., Ahmann M. L., Johnson R. L., Seaburg A. G. (2010) Assessing Barotrauma in Neutrally and Negatively Buoyant Juvenile Salmonids Exposed to Simulated Hydro-turbine Passage Using a Mobile Aquatic Barotrauma Laboratory. *Fisheries Research*, 106 (3), 271–278. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2010.08.006>.
5. Lampert W. (1976) Experiments on the Resistance of Fish to Rapid Increase in Hydrostatic Pressure. *Journal of Fish Biolog*, 8 (5), 381–383. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1976.tb03966.x>.
6. Foye R. E., Scott M. (1965) Effects of Pressure on Survival of Six Species of Fish. *Transactions of the American Fisheries Society*, 94 (1), 88–91. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1965\)94\[88:eoposo\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1965)94[88:eoposo]2.0.co;2).
7. Guo T., Zhang J., Luo Z. (2021) Analysis of Channel Vortex and Cavitation Performance of the Francis Turbine under Partial Flow Conditions. *Processes*, 9 (8), 1385. <https://doi.org/10.3390/pr9081385>.
8. Kumar P., Saini R. P. (2010) Study of Cavitation in Hydro Turbines – A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (1), 374–383. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.024>.
9. Wang L., Cui J., Shu L., Jiang D., Hiang Ch., Li L., Zhou P. (2022) Research on the Vortex Rope Control Techniques in Draft Tube of Francis Turbines. *Energies*, 15 (24), 9280. <https://doi.org/10.3390/en15249280>.
10. Brijkishore, K. R., Prasad V. (2021) Prediction of Cavitation and Its Mitigation Techniques in Hydraulic Turbines—A Review. *Ocean Engineering*, Vol. 221, 108512. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108512>.
11. Ivashchkin V. V., Medvedeva J. A. (2022) Optimization of the Operation of Groundwater Intakes Using Two-Column Wells. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (5), 451–462. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-451-462> (in Russian).
12. Veremenyuk V. V., Ivashchkin V. V., Krytskaya V. I. (2024) Hydraulic Calculation Methodology for Group Well Water Intakes with Paired Prefabricated Water Pipelines. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (3), 268–280. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-268-280> (in Russian).

13. Odeh M. M. (1998) *A Computer Expert System for the Analysis and Design of Cavitating Control* [Dissertation]. Utah State University – Logan, Utah. 127.
14. Tullis J. P. (1989) Fundamentals of Cavitation. *Hydraulics of Pipelines – Pumps, Valves, Cavitation, Transients*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 119–132.
15. Veremenyuk V. V., Ivashchkin V. V., Krytskaya V. I. (2020) The Borehole Water Intakes Mathematical Models with a Branched and Circular Connection Schemes for Prefabricated Water Conduits. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (6), 563–580. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-563-580> (in Russian).
16. Veremenyuk V. V., Ivashchkin V. V., Krytskaya V. I. (2023) Simulation of the Operation of a Borehole Groundwater Intake with an Annular Prefabricated Conduit. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (3), 289–300. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-289-300> (in Russian).
17. Long X., Xu M., Wang J., Zou J., Ji B. (2019) An Experimental Study of Cavitation Damage on Tissue of *Carassius Auratus* in a Jet Fish Pump. *Ocean Engineering*, 174, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.01.052>.
18. Čada G.F., Coutant Ch. C., Whitney R.R. (1997) *Development of Biological Criteria for the Design of Advanced Hydropower Turbines*. Idaho, US Department of Energy. Available at: <https://www1.eere.energy.gov/wind/pdfs/doewater-10578.pdf>.
19. Richmond M. C., Serkowski J. A., Ebner L. L., Sick M., Brown R. S., Carlson T. J. (2014) Quantifying Barotrauma Risk to Juvenile Fish during Hydro-Turbine Passage. *Fisheries Research*, 154, 152–164. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2014.01.007>.
20. Bevelhimer M., Pracheil B. M., Fortner A. M., Saylor R., Deck K. L. (2019) Mortality and Injury Assessment for Three Species of Fish Exposed to Simulated Turbine Blade Strike. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 76 (12), 2350–2363. <http://doi.org/10.1139/cjfas-2018-0386>.