

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 62, № 1
2019

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

Учредители

Электроэнергетический совет СНГ,
Министерство образования Республики Беларусь

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Романюк Ф. А., Ломан М. С., Каченя В. С.** Способы формирования ортогональных составляющих входных сигналов для релейной защиты 5
- Фурсанов М. И., Сазонов П. А.** Анализ эффективности применения композитных опор в электрических сетях Республики Беларусь 15
- Бладыко Ю. В.** Механический расчет гибких проводов воздушных линий с заградительными шарами в различных климатических режимах 24
- Кенсицкий О. Г., Хвалин Д. И., Кобзарь К. А.** Математическая модель совместного расчета электромагнитного поля и нагревов торцевой зоны мощного турбогенератора 37

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Козначеев И. А., Доброго К. В.** Одномерное моделирование фронта внутривластового горения нефти с учетом подвижной и неподвижной горючих компонент 47
- Седнин В. А., Бубырь Т. В.** Численное исследование сложного теплообмена в непроходных каналах теплотрасс 61
- Овсянник А. В.** Турбодетандерная установка на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты. 77

ЭКОНОМИКА ЭНЕРГЕТИКИ

- Чазов Е. Л., Грахов В. П., Криворотов В. В., Симченко О. Л.** Повышение эффективности планирования как основа управления инвестиционной деятельностью промышленного предприятия 88

Главный редактор Федор Алексеевич Романюк

Редакционная коллегия

- В. ВУЙЦИК (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),*
В. В. ГАЛАКТИОНОВ (Русский институт управления имени В. П. Чернова, Москва, Российская Федерация),
М. ДАДО (Зволенский технический университет, Зволен, Словацкая Республика),
В. А. ДЖАНГИРОВ (Комитет ТПП РФ по энергетической стратегии и развитию ТЭК, Москва, Российская Федерация),
К. В. ДОБРЕГО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
И. В. ЖЕЖЕЛЕНКО (Приазовский государственный технический университет, Мариуполь, Украина),
П. В. ЖУКОВСКИ (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
А. С. КАЛИНИЧЕНКО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (первый заместитель главного редактора),
А. И. КИРИЛЛОВ (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация),
А. КОННОВ (Университет Лунда, Швеция),
Б. К. МАКСИМОВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),
Х. МАХКАМОВ (Университет Нортумбрии, Великобритания),
А. А. МИХАЛЕВИЧ (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
Е. С. МИШУК (Исполнительный комитет Энергетического совета Содружества Независимых Государств, Москва, Российская Федерация),
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),
Э. Н. САБУРОВ (Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, Архангельск, Российская Федерация),
А.-С. С. САУХАТАС (Рижский технический университет, Рига, Латвийская Республика),
В. С. СЕВЕРЯНИН (Брестский государственный технический университет, Брест, Республика Беларусь),
И. И. СЕРГЕЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
Б. С. СОРОКА (Институт газа НАН Украины, Киев, Украина),
В. А. СТРОЕВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),
В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ (ООО, Киев, Украина),
Е. В. ТОРОПОВ (Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация),
Е. УШПУРАС (Литовский энергетический институт, Каунас, Литовская Республика),
Б. М. ХРУСТАЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Л. В. ШЕНЕЦ (Евразийская экономическая комиссия, Москва, Российская Федерация)

Ответственный секретарь редакции В. Н. Гурьянчик

Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 5 февраля 2010 г.
Регистрационный номер 1257

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

Подписано к печати 30.01.2019. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,5. Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз.
Дата выхода в свет . 2019. Заказ .

Адрес редакции: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65. Белорусский национальный технический университет, корп. 2, комн. 327. Телефон +375 17 292-65-14.
e-mail: energy@bntu.by; energy-bntu@mail.ru
<http://energy.bntu.by>

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65

© Белорусский национальный технический университет, 2019

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

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 62, No 1
2019

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

Founders

CIS Electric Power Council,
Ministry of Education of the Republic of Belarus

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

CONTENTS

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

- Romaniuk F. A., Loman M. S., Kachenya V. S.** Methods of Forming Orthogonal Components of Input Signals for Relay Protection 5
- Fursanov M. I., Sazonov P. A.** Analysis of the Efficiency of Composite Supports in Electric Networks of the Republic of Belarus. 15
- Bladyko Y. V.** Mechanical Calculation of Flexible Wires of Overhead Lines with Aerial Barrage Balls in Different Climatic Regimes 24
- Kensytskyi O. H., Hvalin D. I., Kobzar K. O.** The Mathematical Model of Coupling Calculation the Electromagnetic Field and Heats of End Zone Powerful Turbogenerator 37

HEAT POWER ENGINEERING

- Koznacheev I. A., Dobrego K. V.** One-Dimensional Simulation of the In-Situ Oil Combustion with Consideration to Fluid and Solid Combustible Components 47
- Sednin V. A., Bubyr T. V.** Numerical Study of Complex Heat Transfer in Blown Impassable Channels of Heating Mains 61
- Ovsyannik A. V.** Carbon Dioxide Turbine Expander Plant Producing Liquid and Gaseous Carbon Dioxide. 77

ECONOMICS OF POWER ENGINEERING

- Chazov E. L., Grakhov V. P., Krivorotov V. V., Simchenko O. L.** Improving the Efficiency of Planning as a Basis for Management the Investment Activity of an Industrial Enterprise 88

Editor-in-Chief Fiodar A. Romaniuk

Editorial Board

- W. T. WÓJCIK (Lublin University of Technology "Politechnika Lubelska", Lublin, Republic of Poland),
V. V. GALAKTIONOV (Russian Institute of Management named after V. P. Chernov, Moscow, Russian Federation),
M. DADO (Technical University in Zvolen, Zvolen, Slovak Republic),
V. A. JANGIROV (RF CCI Committee on Energy Strategy and the Development of Fuel-Energy Complex, Moscow, Russian Federation),
K. V. DOBREGO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
I. V. ZHEZHELENKO (Pryazovskyi State Technical University, Mariupol, Ukraine),
P. W. ZHUKOWSKI (Lublin University of Technology "Politechnika Lubelska", Lublin, Republic of Poland),
A. S. KALINICHENKO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (First Deputy Editor-in-Chief),
A. I. KIRILLOV (Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation),
A. KONNOV (Lund University, Sweden),
B. K. MAKSIMOV (National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation),
K. MAHKAMOV (Northumbria University, United Kingdom),
A. A. MIKHALEVICH (The National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
E. S. MISHUK (The Executive Committee of the Energy Council of the Commonwealth of Independent States, Moscow, Russian Federation),
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),
E. N. SABUROV (Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russian Federation),
A.-S. S. SAUHATAS (Riga Technical University, Riga, Republic of Latvia),
V. S. SEVERYANIN (Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus),
I. I. SERGEY (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
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),
V. I. TIMOSHPOLSKY (LLC, Kiev, Ukraine),
E. V. TOROPOV (South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation),
E. UŠPURAS (Lithuanian Energy Institute, Kaunas, Republic of Lithuania),
B. M. KHROUSTALEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
L. V. SHENETS (The Eurasian Economic Commission, Moscow, Russian Federation)*

Executive Secretary of Editorial Board V. N. Guryanchyk

**Publication is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus in 2010, February, 5th
Reg. No 1257**

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

Passed for printing 30.01.2019. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 12,5.
An edition of 100 copies. Date of publishing 2019. Order list

ADDRESS

Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave., Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-14
e-mail: energy@bntu.by; energy-bntu@mail.ru
<http://energy.bntu.by>

Printed in BNTU. License LP No 02330/74 from 03.03.2014.
220013, Minsk, 65 Nezavisimosty Ave.

© Belarusian National Technical University, 2019

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-5-14>

УДК 621.316.925

Способы формирования ортогональных составляющих входных сигналов для релейной защиты

Ф. А. Романюк¹⁾, М. С. Ломан¹⁾, В. С. Каченя¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Рассмотрены существующие частотные цифровые фильтры для выделения основной частоты синусоидального сигнала, отмечены их преимущества и недостатки. При этом отдано предпочтение комбинированному цифровому фильтру. Проанализированы существующие методы определения ортогональных составляющих синусоидального сигнала, выделены их недостатки. Отмечено, что большинство существующих способов определения ортогональных составляющих чувствительны к отклонению частоты синусоидального сигнала. Это связано с тем, что при отклонении частоты происходит изменение угла одной выборки. Предложен способ решения данной проблемы. Сущность способа заключается в динамическом пересчете угла одной выборки в зависимости от рассчитанной частоты. Представлена математическая модель для исследования способов формирования ортогональных составляющих. Модель включает в себя генератор переходных процессов с учетом апериодической составляющей, комбинированные цифровые фильтры и исследуемые способы формирования ортогональных составляющих. Описан способ формирования переходного процесса с учетом апериодической составляющей. Приведены коэффициенты комбинированных цифровых фильтров для частоты дискретизации 1200 Гц. Представлена одна из реализаций предлагаемого способа формирования ортогональных составляющих на языке программирования MatLab. В качестве исследуемых формирователей ортогональных составляющих выступали один из более популярных методов и предлагаемый способ. Представлены результаты исследований и произведен их анализ.

Ключевые слова: цифровой фильтр, математическая модель, угол одной выборки, основная частота, апериодическая составляющая, шаг дискретизации, коэффициенты цифрового фильтра, гармоника, сигнал, выборка, аварийный режим, амплитудный формирователь, короткое замыкание, преобразование Фурье

Для цитирования: Романюк, Ф. А. Способы формирования ортогональных составляющих входных сигналов для релейной защиты / Ф. А. Романюк, М. С. Ломан, В. С. Каченя // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 1. С. 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-5-14>

Methods of Forming Orthogonal Components of Input Signals for Relay Protection

F. A. Romaniuk¹⁾, M. S. Loman¹⁾, V. S. Kachenya¹⁾

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

Abstract. The existing frequency digital filters for allocation of the fundamental frequency of a sine signal are considered and their advantages and disadvantages are noted. Preference is given to the combined digital filter. The existing methods of determining the orthogonal components

Адрес для переписки

Романюк Федор Алексеевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 331-00-51
faromanuk@bntu.by

Address for correspondence

Romaniuk Fiodar A.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 331-00-51
faromanuk@bntu.by

of a sine signal are analyzed and their disadvantages are pointed out. It is concluded that most of the existing methods for determining orthogonal components are sensitive to the fundamental frequency deviation of the sine signal. This is due to the fact that the deviation of the frequency alters the angle of one sample. The method for solving this problem has been proposed. The essence of the method is the dynamic recalculation of the angle of one sample depending on the calculated frequency. The mathematical model for research of ways of formation of orthogonal components is presented. The model includes transient generator taking into account the aperiodic component, combined digital filter and the methods of formation of orthogonal components under study. The method of transient phenomena formation that takes into account the aperiodic component is described. Coefficients of combined digital filter for sampling frequency of 1200 Hz are given. One of the implementations of the proposed method of formation of orthogonal components in the programming language MatLab is presented. One of the more popular methods and the proposed method acted as the formers of orthogonal components under study. The final part of the article presents the results of the research, as well as their analysis.

Keywords: digital filter, mathematical model, single sample angle, fundamental frequency, aperiodic component, sampling step, digital filter coefficients, harmonic, signal, sample, emergency operation, amplitude shaper, shunt fault, Fourier transform

For citation: Romaniuk F. A., Loman M. S., Kachenya V. S. (2019) Methods of Forming Orthogonal Components of Input Signals for Relay Protection. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (1), 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-5-14> (in Russian)

Введение

Вследствие отклонения частоты электрического сигнала от номинальной вносится погрешность в определение информационных параметров сигнала и снижение надежности работы микропроцессорного устройства релейной защиты. Это влияние можно снизить уменьшением шага дискретизации и использованием технически совершенных аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Данный подход требует задействования больших вычислительных мощностей и, как следствие, дополнительных финансовых затрат на производство аппаратной части и для разработки программного обеспечения. Использование самоподстраивающихся формирователей ортогональных составляющих (ФОС) позволяет решить перечисленные проблемы на алгоритмическом уровне.

Классический способ формирования ортогональных составляющих (ОС) основывается на применении дискретных преобразований Фурье (ДПФ) [1]. ДПФ производится путем параллельной фильтрации сигнала косинусным и синусным частотными фильтрами, что на выходе дает два сигнала с фазовым сдвигом для основной частоты в 90° , которые по своей сути и являются ортогональными составляющими вектора входного сигнала.

Иные способы определения ОС основаны на выделении первой ОС с помощью цифрового фильтра (ЦФ) и на вычислении другой с учетом первой. Различные варианты реализации, базирующиеся на данном положении, представлены в [2–4].

Недостаток приведенных выше способов заключается в том, что они используют константы, которые выбраны для фиксированного угла одной выборки, а при изменении основной частоты угол одной выборки изменяется и вносится погрешность в определение информационных параметров сигнала.

В данной статье рассматривается способ формирования ОС, который анализирует сигнал, поступающий с частотного ЦФ, и определяет наиболее вероятный угол одной выборки, тем самым подстраиваясь под ситуацию, описанные выше.

Основная часть

Для получения информационных параметров аналоговых сигналов токов и напряжений в цифровых релейных защитах используется предварительная аналоговая фильтрация фильтрами низших частот второго порядка с последующей фильтрацией нерекурсивными цифровыми фильтрами и выделением ОС их выходного сигнала. Уравнение таких ЦФ записывается в виде

$$u_x(n) = \sum_{i=0}^{N-1} y(n-i)A(i), \quad (1)$$

где n – номер текущей выборки; $y(n)$ – n -е значение входного сигнала ЦФ; $u(n)$ – n -е значение выходного сигнала ЦФ; $A(i)$ – значение i -го коэффициента; N – количество коэффициентов ЦФ.

Для фильтрации сигнала применяются ЦФ с синусными или косинусными коэффициентами. Преимущество ЦФ с синусными коэффициентами заключается в лучшем подавлении высших частот, не кратных выделяемой. Недостаток таких фильтров – в высокой чувствительности к низшим частотам и к аperiodической составляющей, что приводит к увеличению времени переходного процесса.

Косинусные ЦФ отличаются практически полным подавлением аperiodической составляющей и лучшим подавлением низших частот, не кратных выделяемой. Недостаток таких фильтров – в более высокой чувствительности к высшим частотам, не кратным выделяемой.

Для устранения недостатков косинусных и синусных ЦФ в [4] предлагается совместное использование этих фильтров. Структурная схема такого фильтра приведена на рис. 1.

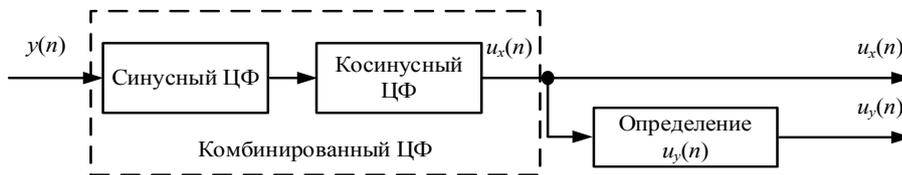


Рис. 1. Структурная схема комбинированного формирователя ортогональных составляющих
 Fig. 1. Block diagram of the combined orthogonal components former (OCF)

В комбинированных ЦФ выделение необходимой гармоники входного сигнала $y(n)$ происходит в два этапа. На первом этапе входной сигнал фильтруется синусным фильтром. Это позволяет в достаточно высокой степени подавить высшие частоты и в меньшей – низшие. Затем полученный сигнал проходит фильтрацию косинусным фильтром, где происходят подавление аperiodической составляющей и дополнительное подавление всех низших и высших частот. После этого из полученного сигнала $u_x(n)$ выделяются ортогональные составляющие. Первая ОС принимается равной $u_x(n)$, а вторая вычисляется по двум последним выборкам этого же сигнала

$$u_y(n) = \frac{u_x(n) \cos(\Delta\varphi) - u_x(n-1)}{\sin(\Delta\varphi)}, \quad (2)$$

где $u_x(n)$ – n -е значение известной ОС; $u_y(n)$ – n -е значение вычисляемой ОС; $\Delta\varphi$ – угол одной выборки сигнала основной частоты, $\Delta\varphi = 2\pi f \Delta t$; f – частота сигнала; Δt – шаг дискретизации АЦП.

Амплитуду сигнала можно определить следующим образом:

$$U = \sqrt{u_x(n)^2 + u_y(n)^2}. \quad (3)$$

Поскольку при изменении частоты сигнала происходит изменение угла одной выборки $\Delta\varphi$, вместе с ним меняются значения коэффициентов $\cos(\Delta\varphi)$ и $\sin(\Delta\varphi)$. Вследствие того что значения этих коэффициентов задаются жестко, амплитуда сигнала рассчитывается с погрешностью. Для устранения этой проблемы необходимо динамически рассчитывать косинус и синус углов одной выборки.

Для каждых трех последовательных выборок синусоидального сигнала справедливы следующие выражения:

$$\begin{aligned} u_x(n) &= U \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right); \\ u_x(n-1) &= U \sin\left(\frac{2\pi n}{N} - \Delta\varphi\right); \\ u_x(n-2) &= U \sin\left(\frac{2\pi n}{N} - 2\Delta\varphi\right). \end{aligned}$$

Из приведенных выражений составим следующее соотношение:

$$\frac{u_x(n) + u_x(n-2)}{2u_x(n-1)} = \frac{U \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + U \sin\left(\frac{2\pi n}{N} - 2\Delta\varphi\right)}{2U \sin\left(\frac{2\pi n}{N} - \Delta\varphi\right)}.$$

Проведя все необходимые сокращения и тригонометрические преобразования, получим формулу для определения косинуса угла одной выборки

$$\cos(\Delta\varphi) = \frac{u_x(n) + u_x(n-2)}{2u_x(n-1)}. \quad (4)$$

Зная косинус угла одной выборки, можно определить синус

$$\sin(\Delta\varphi) = \sqrt{1 - \cos(\Delta\varphi)^2}. \quad (5)$$

У способа определения $\cos(\Delta\varphi)$ по (4) есть недочеты. Один из них связан с прохождением синусоидального сигнала через нуль. Исходя из (4) при значении $u_x(n-1) = 0$ величина $\cos(\Delta\varphi)$ будет рассчитана неверно. Запишем условия:

$$|u_x(n-1)| \leq u_{null} \ \& \ u_x(n) > u_{null} \ \& \ u_x(n-2) < u_{null}; \quad (6)$$

$$|u_x(n-1)| \leq u_{null} \ \& \ u_x(n) < u_{null} \ \& \ u_x(n-2) > u_{null}, \quad (7)$$

где u_{null} – пороговое значение выборки, при котором она считается нулевой.

Таким образом, при выполнении условия (6) или (7) можно предположить, что произошел переход сигнала через нуль, и брать значение $\cos(\Delta\varphi)$ из предыдущего шага расчета.

При активном переходном процессе мгновенные выборки могут не соответствовать синусоидальному сигналу и рассчитанные величины $\cos(\Delta\varphi)$ будут невалидными:

$$|u_x(n-1)| \leq u_{null}; \quad (8)$$

$$|u_x(n)| \leq u_{null} \ \& \ |u_x(n-2)| \leq u_{null}. \quad (9)$$

В таких ситуациях при выполнении условия (8) или (9) необходимо принять $\cos(\Delta\varphi)$ равным последнему валидному значению, рассчитанному на основании способов определения частоты [5]. Также значение $\cos(\Delta\varphi)$, рассчитанное по (3), должно лежать в диапазоне, определенном максимальной и минимальной измеряемыми частотами:

$$\cos(1,1\Delta\varphi_{\max}) \leq \cos(\Delta\varphi) \leq \cos(0,9\Delta\varphi_{\min}), \quad (10)$$

где $\Delta\varphi_{\max} = 2\pi f_{\max}\Delta t$; $\Delta\varphi_{\min} = 2\pi f_{\min}\Delta t$ – максимальный и минимальный углы одной выборки; f_{\max}, f_{\min} – верхний и нижний пределы рабочей частоты.

При невыполнении условия (10) значение $\cos(\Delta\varphi)$ должно рассчитываться на основании способов определения частоты.

Описание модели исследования

Все исследования проводились в системе динамического моделирования MatLab Simulink [6]. Структурная схема модели исследования приведена на рис. 2. Она состоит из однофазного генератора переходного процесса (ПП), аналого-цифрового преобразователя (АЦП), комбинированного ЦФ [4], формирователей ортогональных составляющих (ФОС1, ФОС2) и амплитудного формирователя.

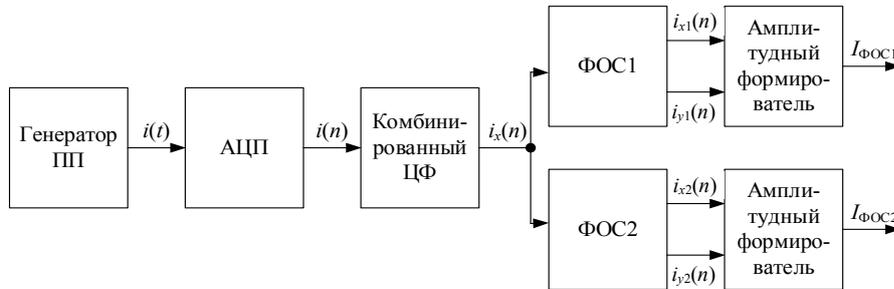


Рис. 2. Структурная схема модели исследования

Fig. 2. Block diagram of the research model

Генератор ПП генерирует мгновенные значения токов для предаварийного и аварийного режимов с учетом аperiодической составляющей в соответствии с [7]. Предаварийный режим моделируется согласно выражению

$$i_{па}(t) = \sqrt{2} \cdot I_{па} \sin(\omega t - \varphi_{па}), \quad (11)$$

где $I_{па}$ – действующее значение тока предаварийного режима; ω – угловая скорость, $\omega = 2\pi f$; $\varphi_{па}$ – угол нагрузки в предаварийном режиме.

Аварийный режим генерируется в соответствии с выражением

$$i_a(t) = \sqrt{2} \cdot I_a \sin(\omega t - \varphi_a) + \sqrt{2} \cdot (I_{па} \sin(\omega t_0 - \varphi_{па}) - I_a \sin(\omega t_0 - \varphi_a)) e^{\frac{-(t-t_0)}{T_a}}, \quad (12)$$

где I_a – действующее значение тока аварийного режима; φ_a – угол короткого замыкания (КЗ) аварийного режима; t_0 – момент времени начала переходного режима; T_a – постоянная времени затухания аperiodической составляющей.

Для работы генератора тока КЗ необходимо задать: действующее значение предаварийного тока $I_{па}$; угол нагрузки в предаварийном режиме $\varphi_{па}$; действующее значение тока аварийного режима I_a ; угол КЗ аварийного режима φ_a ; частоту сигнала f ; момент времени начала переходного процесса t_0 и значение постоянной времени затухания аperiodической составляющей T_a .

Блок АЦП представлен элементом Zero-Order Hold. Частота дискретизации АЦП составляет 1200 Гц.

Комбинированный ЦФ описан в [4]. Этот фильтр представляет собой два последовательно соединенных фильтра и с использованием линейной дискретной свертки [8] может быть приведен к фильтру, соответствующему выражению (1), с количеством коэффициентов $N + M - 1$ (где N , M – количество коэффициентов первого и второго фильтров). Коэффициенты свертки полного синусного фильтра на 24 выборки и половинного косинусного фильтра на 12 выборок представлены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты свертки комбинированного фильтра
Convolution coefficients of the combined filter

n	$A(n)$	n	$A(n)$
0	0	18	-0,0830
1	0,0036	19	-0,0810
2	0,0104	20	-0,0720
3	0,0196	21	-0,0590
4	0,0301	22	-0,0420
5	0,0402	23	-0,0220
6	0,0486	24	0
7	0,0500	25	0,0180
8	0,0541	26	0,0313
9	0,0491	27	0,0393
10	0,0382	28	0,0421
11	0,0216	29	0,0402
12	0	30	0,0347
13	-0,0216	31	0,0268
14	-0,0417	32	0,0180
15	-0,0589	33	0,0098
16	-0,0722	34	0,0035
17	-0,0805	–	–

Блок ФОС1 формирует ортогональные составляющие в соответствии с формулой (2), где $\cos(\Delta\varphi)$ – заранее известная величина, рассчитанная для частоты сигнала 50 Гц и частоты дискретизации сигнала 1200 Гц.

Блок ФОС2 формирует ортогональные составляющие в соответствии с (2), где $\cos(\Delta\varphi)$ вычисляется динамически, учитывая (4) и условия (6)–(10). Ниже приведен код функции на языке программирования MatLab [9], реализующий алгоритм для вычисления $\cos(\Delta\varphi)$:

```
function y = fun(u0, u1, u2, cos1) % Функция для расчета
значения косинуса угла одной выборки где u0, u1, u2 - вы-
борки отфильтрованного сигнала с задержкой 0, 1 и 2 периода
дискретизации
T = 1200; % Частота дискретизации АЦП, Гц
dPhiMax = 2*pi*55/T; % Максимальное допустимое значение
угла одной выборки, rad
dPhiMin = 2*pi*45/T; % Минимальное допустимое значение
угла одной выборки, rad
uNull = 0.05; % Пороговое значение выборки при котором
она считается нулевой
N = 24; % Количество выборок на период сигнала с частотой
50 Гц
cosx = (u0 + u2)/(2 * u1);
if(abs(u1) <= uNull && u0 > uNull && u2 < uNull ||
abs(u1) <= uNull && u0 < uNull && u2 > uNull)
    cos0 = cos1;
elseif( (abs(u0) <= uNull && abs(u1) <= uNull) ||
(abs(u2) <= uNull && abs(u0) <= uNull) ||
(abs(u1) <= uNull))
    cos0 = cos(2*pi/N);
elseif (cosx > cos(0.9*dPhiMin) ||
cosx < cos(1.1*dPhiMax))
    cos0 = cos(2*pi/N);
else
    cos0 = cosx;
end
y = cos0;
```

Амплитудный формирователь производит вычисление амплитуды сигнала на основании поданных на его вход ортогональных составляющих. Данный блок реализует вычисления в соответствии с (3) и не отличается для ФОС1 и ФОС2.

Результаты исследований

Фильтры ФОС1 и ФОС2 исследовались для различных частот синусоидального сигнала и для сигналов разных частот, соответствующих переходному режиму, с учетом аperiodической составляющей.

Реакция ФОС1 и ФОС2 на входной синусоидальный сигнал с частотами 55, 50 и 45 Гц представлена соответственно на рис. 3а–с. Из рис. 3 видно, что для частот 55 и 45 Гц ФОС1 определяет амплитуду сигнала с погрешностью [8, 10]

$$E_{\max} = |150 - 3f|. \quad (13)$$

ФОС2, в свою очередь, не имеет данной погрешности, что является преимуществом этого способа.

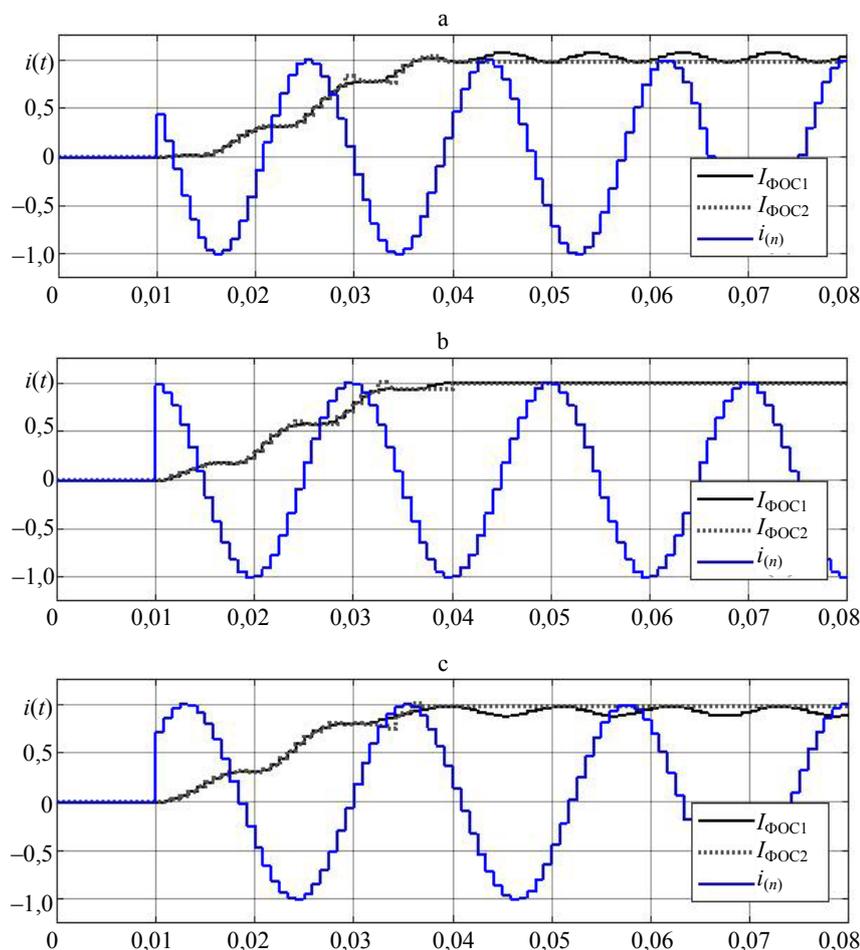


Рис. 3. Реакция ФОС1 и ФОС2 с комбинированными частотными фильтрами на синусоидальный сигнал для частот, Гц: а – 55; б – 50; в – 45; $I_{\text{ФОС1}}$ – амплитуда сигнала, полученного с помощью ФОС1; $I_{\text{ФОС2}}$ – то же, полученного с помощью ФОС2; $i(n)$ – дискретизированный сигнал, поступающий на вход комбинированного фильтра

Fig. 3. Response of OCF1 and OCF2 with combined frequency filters to sine signal for frequencies, Hz: а – 55; б – 50; в – 45; $I_{\text{ФОС1}}$ – amplitude of the signal obtained by OCF1; $I_{\text{ФОС2}}$ – amplitude of the signal obtained by OCF2; $i(n)$ – discrete signal coming to the input of the combined filter

Реакция ФОС1 и ФОС2 на входной синусоидальный сигнал с частотами 55, 50 и 45 Гц и наложенной на него аperiodической составляющей показана соответственно рис. 4а–с.

Из рис. 4 видно, что для частоты 50 Гц переходные характеристики способа с ФОС2 не уступают ФОС1, притом что для частот 55 и 45 Гц характеристики ФОС2 значительно лучше ФОС1.

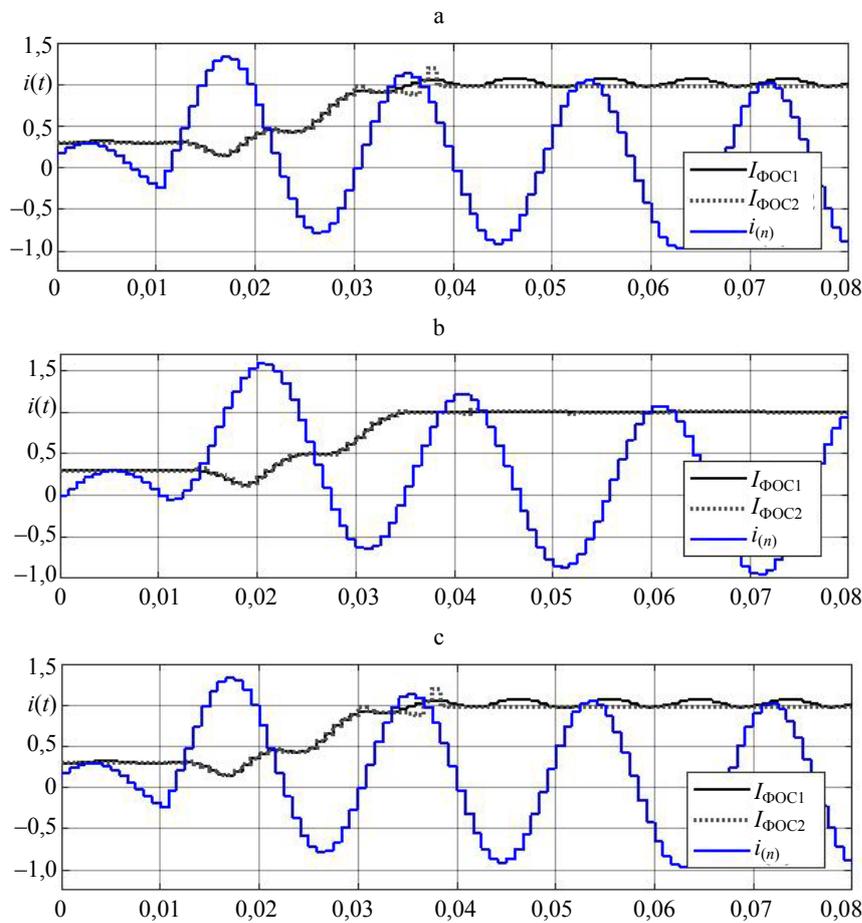


Рис. 4. Реакция ФОС1 и ФОС2 с комбинированными частотными фильтрами на сигнал, соответствующий току короткого замыкания с аperiodической составляющей для частот, Гц: а – 55; б – 50; в – 45; $I_{\text{ФОС1}}$, $I_{\text{ФОС2}}$, $i(n)$ – то же, что на рис. 3

Fig. 4. Response of OCF1 and OCF2 with combined frequency filters to the signal of the short circuit current from the aperiodic component for frequencies, Hz: а – 55; б – 50; в – 45; $I_{\text{ФОС1}}$, $I_{\text{ФОС2}}$, $i(n)$ – same as in fig. 3

ВЫВОДЫ

1. Большинство из существующих формирователей ортогональных составляющих приобретают погрешность при отклонении основной частоты от номинальной. Эта погрешность вызвана изменением электрического угла одной выборки.
2. Самоподстраивающийся формирователь ортогональных составляющих решает проблему точного определения информационных параметров синусоидального сигнала при отклонении основной частоты от номинальной.
3. Описанный способ определения косинуса угла одной выборки может быть адаптирован к другим типам формирователей ортогональных составляющих.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
2. Романюк, Ф. А. Информационное обеспечение микропроцессорных защит электроустановок / Ф. А. Романюк. Минск: Технопринт, 2001. 133 с.
3. Романюк, Ф. А. Аналого-цифровая частотная фильтрация входных сигналов релейной защиты / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 1994. № 3–4. С. 7–12.
4. Romanyuk, F. A. Digital Filters to Separate the First and Second Harmonics of Signals in Microprocessor-Bases Protection of Electrical Installations Equipped with Transformers / F. A. Romanyuk, V. S. Kachenya, K. Kierczynski // Przegląd Elektrotechniczny. 2018. Vol. 1, No 7. P. 48–51. <https://doi.org/10.15199/48.2018.07.11>.
5. Романюк, Ф. А. Формирование ортогональных составляющих контролируемых величин в микропроцессорной защите понижающего трансформатора / Ф. А. Романюк, М. С. Ломан // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2012. № 4. С. 5–9.
6. Романюк, Ф. А. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем / Ф. А. Романюк, В. И. Новаш. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1998. 174 с.
7. Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты / Ю. В. Румянцев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 5. С. 397–417. DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417.
8. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
9. Дьяконов, В. П. MatLab и Simulink для радиоинженеров / В. П. Дьяконов. М.: ДМК Пресс, 2011. 975 с.
10. Horowitz, S. H. Power System Relaying. Fourth Edition / S. H. Horowitz, A. G. Phadke, J. K. Niemira. Wiley, 2014. 400 p.

Поступила 04.09.2018 Подписана в печать 30.11.2018 Опубликована онлайн 30.01.2019

REFERENCES

1. Shneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
2. Romaniuk F. A. (2001) *Information Support of Microprocessor-Based Protection of Electrical Installations*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 133 (in Russian).
3. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu. (1994) *Analog-to-Digital Frequency Filtering of the Input Signals of Relay Protection*. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (3–4), 7–12 (in Russian).
4. Romanyuk F. A., Kachenya V. S., Kierczynski K. (2018) Digital Filters to Separate the First and Second Harmonics of Signals in Microprocessor-Bases Protection of Electrical Installations Equipped with Transformers. *Przegląd Elektrotechniczny*, 1 (7), 48–51. <https://doi.org/10.15199/48.2018.07.11>.
5. Romaniuk F. A., Loman M. S. (2012) Formation of Orthogonal Controlled Value Components in Micro-Processor Protection of Power Reducing Transformer. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 2012, (4), 5–9 (in Russian).
6. Romanyuk F. A., Novash V. I. (1998) *Information Support of Computing Experiment in Relay Protection and Automation of Power Systems*. Minsk, VUZ-YUNITI Publ. 174 (in Russian).
7. Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2016) Digital Filters Implementation in Microprocessor-Based Relay Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (5), 397–417 (in Russian). DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417.
8. Chernykh I. V. (2011) *Simulation of Electrical Devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink*. Moscow, DMK Press. 288 (in Russian).
9. D'yakonov V. P. (2011) *MatLab and Simulink for Radio Engineers*. Moscow, DMK Press Publ. 975 (in Russian).
10. Horowitz S. H., Phadke A. G., Niemira J. K. (2014) *Power System Relaying. Fourth Edition*. Wiley. 400.

Received: 4 September 2018 Accepted: 30 November 2018 Published online: 30 January 2019

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-15-23>

УДК 621.311.1

Анализ эффективности применения композитных опор в электрических сетях Республики Беларусь

М. И. Фурсанов¹⁾, П. А. Сазонов¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Современные условия развития электроэнергетики повышают требования в области технических условий и надежности, в частности ряд западных стран проводит реструктуризацию электрических сетей на базе безопасных, экологических и надежных композитных опор. В статье проанализированы структура, конструкции и методы сооружения воздушных линий электропередачи с более перспективными, по сравнению с традиционными, композитными опорами. Рассмотрены свойства, основные качества и преимущества материалов для производства опор из стеклопластика и древесины. Сопоставлены преимущества и недостатки композитных и деревянных стоек и показано, что большинству требований, предъявляемых к опорам воздушных линий электропередачи, соответствуют именно композитные опоры. Установлено, что существующие и перспективные решения, позволяющие эффективно применять композитные опоры при сооружении воздушной линии, достаточно разнообразны. В настоящее время в электрических сетях западных стран наиболее распространены конструктивные модели возведения воздушной линии с чередованием композитных и деревянных опор в определенной последовательности. Предложен оптимальный вариант применения композитных опор вместе с деревянными в пропорции: четыре композитные стойки на одну деревянную (метод сооружения «4/1»). Представлены преимущества подобного способа сооружения линии электропередачи: значительное повышение механической прочности конструкции опор и проводов, безопасности их обслуживания. Произведен технико-экономический расчет, который подтверждает преимущество возведения распределительной линии 10 кВ по схеме «4/1». Внедрение композитных опор в электрических сетях Республики Беларусь в долгосрочной перспективе позволит получить ощутимый финансовый эффект за счет сокращения издержек на эксплуатацию воздушной линии и значительного срока эксплуатации композитных стоек, что является несомненным плюсом в условиях современной рыночной экономики.

Ключевые слова: электрическая сеть, конструктивное исполнение, композитные опоры, надежность, оптимизация

Для цитирования: Фурсанов, М. И. Анализ эффективности применения композитных опор в электрических сетях Республики Беларусь / М. И. Фурсанов, П. А. Сазонов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 1. С. 15–23. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-15-23>

Адрес для переписки

Фурсанов Михаил Иванович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел: +375 17 292-65-82
elsyst@bntu.by

Address for correspondence

Fursanov Mishail I.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-82
elsyst@bntu.by

Analysis of the Efficiency of Composite Supports in Electric Networks of the Republic of Belarus

M. I. Fursanov¹⁾, P. A. Sazonov¹⁾

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

Abstract. Modern conditions for the development of the electric power industry increase the requirements in the field of technical conditions and reliability; thus, in a number of Western countries electric networks are being restructured on the basis of safe, environmentally friendly and reliable composite supports. The article analyzes the structure, design and methods of construction of overhead power lines with composite supports that are more promising than traditional ones. The properties, main characteristics and advantages of materials for the production supports of fiberglass and of wood are considered. The advantages and disadvantages of composite and wooden racks are compared and it is shown that most of the requirements for the supports of overhead power lines are met by composite supports. It is discovered that the existing and promising solutions that enable effective use of composite supports in the construction of an overhead line are quite diverse. Currently, in the electrical networks of Western countries, the most common structural model of the construction of an overhead line is the one that alternates composite and wooden supports in a certain sequence. The best option of the use of composite supports along with wood ones is the following ratio: four composite supports to one wooden one (method of construction “4/1”). The advantages of this method of construction of the power line are presented, viz. a significant increase in the mechanical strength of the structure of supports and wires as well as the safety of their maintenance. The results of technical and economic calculation that confirm the advantage of constructing a 10 kV distribution line according to the “4/1” scheme are presented. The implementation of composite supports in the electric networks of the Republic of Belarus in the long term will allow obtaining a tangible financial effect by reducing the cost of operation of the overhead line and because of a significant period of operation of composite racks, which is an undoubted advantage in conditions of the modern market economy.

Keywords: electric network, structural design, composite supports, reliability, optimization

For citation: Fursanov M. I., Sazonov P. A. (2019) Analysis of the Efficiency of Composite Supports in Electric Networks of the Republic of Belarus. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (1), 15–23. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-15-23> (in Russian)

Введение

Энергетическая отрасль активно развивается, поэтому постоянно возрастают требования, предъявляемые к надежности электроснабжения, что требует разработки и внедрения принципиально новых, соответствующих современным стандартам технических решений. Одна из структур электрических сетей – воздушные линии электропередачи (ВЛЭП). Применение новых технологий при сооружении воздушных линий (ВЛ) – это уменьшение затрат на строительство и эксплуатацию линии: снижение сроков и трудоемкости строительно-монтажных работ, повышение сроков службы, надежности, снижение параметров потока отказов и ущерба от недоотпуска электроэнергии [1–5].

Сооружение высоконадежных воздушных линий электропередачи – приоритетная задача для энергетики любого государства, так как именно от электрических сетей зависит качество продукта, который получают ко-

нечные потребители, и финансовые средства, необходимые для содержания каналов электропередачи [6–10].

В настоящее время для сооружения, эксплуатации и ремонта питающих и распределительных линий электропередачи часто применяются конструкции на базе композитных опор ВЛЭП [6, 7]. Композитные опоры – это строительные конструкции, основным материалом для производства которых являются стеклопластики, предназначенные для удержания проводов и грозозащитных тросов на заданном расстоянии от земли и друг от друга. Стеклопластик – пластичный материал, в основу которого положены стекловолокно (кварцевое или стеклянное волокно) и связующее вещество (термопластические полимеры) [2]. Композитные опоры представляют собой новый тип конструкций, получивший распространение при сооружении и реконструкции воздушных линий электропередачи в США и Канаде (рис. 1) в 2000-е гг. и успешно применяемый в настоящее время. В США композитные опоры часто используются для замены поврежденных или пришедших в негодность традиционных металлических, деревянных опор или их частей.

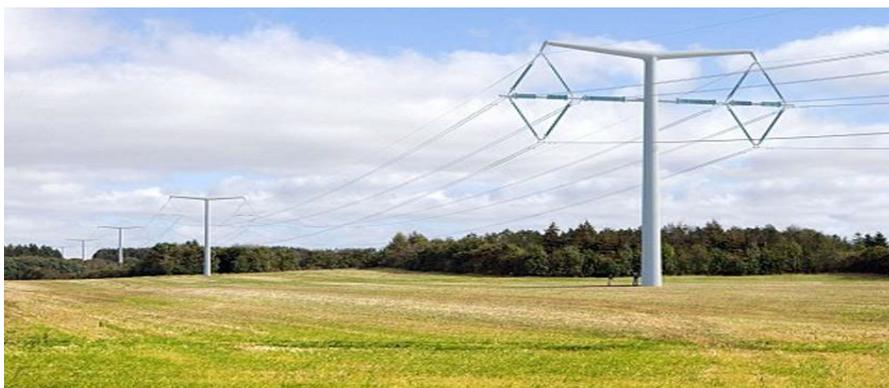


Рис. 1. Линия 110 кВ с применением композитных опор (Канада)

Fig. 1. 110 kV line with the application of the composite supports (Canada)

Основная часть

Главными преимуществами композитных опор ВЛ являются компактность, легкость, высокая скорость монтажа, позволяющие значительно ускорить восстановление электроснабжения при повреждении или разрушении опор, в том числе и в труднодоступной местности. Электрофизические параметры композитных стоек близки к деревянным, поэтому в распределительных сетях западные энергокомпании используют их для замены деревянных опор.

В развитых странах опоры фирмы RStandard эффективно применяются в сетях среднего напряжения. В [1] авторы показывают достаточность чередования композитных и деревянных опор в определенной последовательности при сооружении воздушных линий электропередачи, что в значительной степени повышает эксплуатационные характеристики линии.

За счет применения как передовых, так и проверенных временем материалов в пропорции четыре композитные опоры на одну деревянную (метод сооружения «4/1») обеспечивается максимально доступная надежность на сегодняшний день при умеренных затратах на сооружение линии.

Повышенные эксплуатационные характеристики композитных опор, по сравнению с традиционными, объясняются свойствами стеклопластика, из которого они изготавливаются. Стеклопластики обладают высокими физико-механическими характеристиками при малой плотности [2, с. 27]. При использовании определенных смол и армирующих материалов можно получить стеклопластики, превосходящие по прочностным характеристикам сплавы цветных металлов и сталь. Физико-механические свойства различных материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические свойства различных материалов
Physical and mechanical properties of various materials

Показатель	Стеклопластик	Железобетон	Сталь	Алюминий
Плотность, т/м ³	1,6–2,0	2,5	7,8	2,7
Разрушающее напряжение при растяжении, МН/м ²	410–1180	В 10 раз меньше, чем на сжатие	410–480	80–430
Предел прочности при изгибе, МН/м ²	690–1240	5,2	400	275
Модуль упругости при растяжении, ГПа	21–41	0,07	210	70
Коэффициент линейного расширения, $\times 10^{-6}$ м/град	5–14	12–15	11–14	22–23
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,30–0,35	1,5–2,0	46	140–190

Механические свойства стеклопластика определяются преимущественно характеристиками наполнителя и прочностью его связи со связующим материалом. Стеклопластики с ориентированно расположенными непрерывными волокнами имеют наибольшие показатели прочности и жесткости. Подобный стеклопластик разделяют на перекрестный и направленный. В первом случае волокна расположены под углом друг к другу, угол может изменяться для регулирования механических характеристик конструкции, во втором – параллельно. В условиях производства стеклопластики хорошо окрашиваются в любой цвет, при использовании стойких красителей могут сохранять его неограниченное время (рис. 2). Также применение стеклопластика позволяет изготовить конструкцию любой формы, что в перспективе может повысить эстетическую составляющую [2, с. 31].

Высокие эксплуатационные характеристики ВЛЭП зависят от достоинств элементов, входящих в нее.



Рис. 2. Окрашенный стеклопластик
Fig. 2. Colored fiberglass

Преимущества композитных стоек [3]:

- хорошие диэлектрические свойства. По своим изоляционным характеристикам стеклопластиковые опоры практически аналогичны деревянным. Изоляционные свойства материала позволяют применять новые решения по защите линий от грозовых перенапряжений, в том числе основанные на увеличении электрической прочности фазной изоляции;
- малая масса. Композитные опоры имеют вес на порядок меньший, чем традиционные аналоги из железобетона или металла;
- простота хранения, транспортировки. Опора состоит из полых секций, которые можно хранить, транспортировать одна в другой (рис. 3);



Рис. 3. Принцип хранения и транспортировки композитных стоек
Fig. 3. The principle of storage and transportation of composite racks

- долговечность. Проведенные испытания показали, что срок службы стоек составляет приблизительно 70 лет;
- упругость. Благодаря эластичности (гибкости) стойки выдерживают большие ветровые и гололедные нагрузки. Высокая эластичность композитных конструкций позволяет избежать остаточной деформации;
- минимальное обслуживание. Высокая стабильность материала позволяет эксплуатировать композитные опоры в суровых климатических условиях;
- физические свойства. Композитные опоры не подвержены гниению и коррозии, воздействию птиц (дятлов) и насекомых, обладают высокой огнестойкостью и могут стать абсолютно негорючими, если их покрыть несколькими слоями огнестойкого средства;
- модульная конструкция позволяет изменять высоту опор, используя различное количество и набор модулей, а также применять отдельные мо-

дули в ремонтных работах. Например, компания Southern California Edison использовала отдельные композитные модули для восстановления деревянных опор, сломанных на высоте от 1,5 до 2,4 м над уровнем земли, но по всем остальным параметрам находившихся в прекрасном состоянии;

- упрощение работ по монтажу. Для сооружения линий с применением композитных стоек не требуется тяжелой техники и сложного монтажного оборудования, что ведет к снижению затрат на строительство ВЛЭП;

- экологичность. Токсичные компоненты не применяются при производстве и не выделяются в окружающую среду в процессе эксплуатации.

Использование композитных опор не влечет за собой загрязнения окружающей среды и проблем, подобных тем, которые возникают с пропитанными креозотом деревянными опорами.

Недостаток у композитных стоек один – высокая стоимость. В настоящее время производство подобных опор в Республике Беларусь отсутствует.

Для производства деревянных опор требуемого качества для сооружения воздушных линий электропередачи по методу «4/1» необходимы хвойные породы древесины. Лучшим вариантом по соотношению механические свойства/цена является сосна, пропитанная антисептиками при строгом соблюдении технологии обработки.

Преимущества деревянных стоек [5]:

- простота в обслуживании – электромонтер легко и безопасно поднимается на опору и спускается с нее, что способствует сокращению производственного травматизма и времени на обслуживание ВЛ;

- не требуют бережного обращения (в допустимых, естественно, пределах) при перевозке, разгрузке, складировании, установке в котлованы;

- для увеличения срока службы можно производить дополнительное антисептирование в местах, подверженных более интенсивному гниению: места установки траверс и переходов «земля – воздух»;

- пропитанные антисептиком опоры (без нарушения технологического цикла и технических условий) могут служить 40 лет и более;

- низкая стоимость по сравнению с железобетонными стойками и металлическими аналогами.

Ряд преимуществ деревянных опор аналогичен преимуществам композитных стоек: хорошие диэлектрические свойства, механическая прочность и упругость материала, малый вес, отсутствие эффекта «Домино», когда тяжелая опора, например железобетонная, падает и увлекает за собой все опоры в анкерном пролете. Легкие композитные опоры будут удерживаться на натянутых проводах, что сокращает число аварийных отключений и затраты на ремонт и обслуживание воздушной линии электропередачи.

Применение одной деревянной опоры на четыре композитные при использовании стоек до 14 м позволяет добавить жесткости конструкции в случае значительных вертикальных перегрузок: ураган, ДТП и т. д. Также это значительно снижает капиталовложения в сооружение воздушной линии электропередачи.

Применение композитных опор позволяет уменьшить напряжение в материале провода при гололедной и ветровой нагрузках за счет того,

что опоры «дышат» под механической нагрузкой: работают на изгиб. Чем меньше механическая нагрузка в материале провода, тем больше его срок службы и меньше вероятность обрыва в экстремальных погодных условиях. Систематический расчет провода приведен в табл. 2 для метода сооружения «4/1» и традиционного с применением железобетонных опор. Расчет актуален, если при сооружении линии применять композитные стойки канадского производства (фирмы RStandard).

Таблица 2

Результаты расчета напряжений в материале и стрелы провеса проводов для воздушных линий, сооруженных методом «4/1» и с применением традиционных железобетонных опор
The results of the calculation of tensions in the material and a sag of a conductor for overhead lines constructed by the «4/1» method using traditional concrete supports

Марка провода	$L_{\text{габ}}, \text{ м}$	$L_{\text{вес}}, \text{ м}$	$f_{\text{гол}}, \text{ м}$	$f_{\text{ветер}}, \text{ м}$	$f_{+}, \text{ м}$	$f_{-}, \text{ м}$	$\sigma_{\text{гол}}, \text{ даН/мм}^2$	$\sigma_{\text{ветер}}, \text{ даН/мм}^2$	$\sigma_{+}, \text{ даН/мм}^2$	$\sigma_{-}, \text{ даН/мм}^2$
Метод сооружения «4/1»										
СИП-3	94	112	2,90	1,32	2,9	1,11	0,29	0,169	5,95	4,86
АС	73	87	0,23	0,31	0,9	0,17	10,07	7,410	2,55	12,00
Железобетонные опоры										
СИП-3	94	112	2,81	1,29	2,9	1,11	0,310	0,175	5,95	4,86
АС	73	87	0,22	0,30	0,9	0,17	10,775	7,706	2,55	12,00

Цена на композитные опоры выше, чем на традиционные. Высокую цену компенсируют низкие издержки при эксплуатации ВЛ: уход за механической частью не требуется, необходимо обслуживать исключительно трассу. Переход к подобной схеме можно производить постепенно, заменяя поврежденные железобетонные опоры на композитные.

Как известно, срок службы железобетонных опор 20–25 лет, причем гарантия на подобные опоры не распространяется. У композитных опор заявленный заводом-изготовителем срок службы составляет 100 лет. Поэтому введем такую экономическую характеристику, как средний показатель себестоимости. Средний показатель себестоимости проекта – это отношение капитальных затрат в сооружение линии к ее сроку эксплуатации

$$P_{\text{п}} = \frac{K}{T},$$

где $P_{\text{п}}$ – средний показатель себестоимости проекта, бел. руб./год; K – капиталовложения в сооружение линии электропередачи, бел. руб.; T – срок эксплуатации линии, лет.

Технико-экономические показатели для линии 10 кВ протяженностью 34,1 км, сооруженной по методу «4/1» с применением композитных и деревянных опор, а также для аналогичной линии, сооруженной с применением традиционных железобетонных опор, приведены в табл. 3.

Оба варианта сооружения электрической сети имеют положительный показатель рентабельности и чистый дисконтированный доход, что свидетельствует об экономической целесообразности сооружения воздушной

линии электропередачи по двум схемам. Однако традиционные показатели у схемы с применением железобетонных опор несколько выше. Это объясняется стремлением окупить линию как можно быстрее. Если учитывать долгосрочную перспективу (композитные опоры имеют срок службы, заявленный заводом-изготовителем, в пять раз больше, чем железобетонные), также стоит принимать во внимание значительно меньшие издержки на техническое обслуживание линии с композитными и деревянными стойками с учетом, что стоимость проекта на композитных стойках больше в 1,784 раза.

Таблица 3

Технико-экономические показатели линии электропередачи
Technical and economic indicators of the power transmission line

Показатель	Метод сооружения «4/1»	Железобетонные опоры
Капитальные затраты на закупку опор воздушной линии, в том числе стоимость проводов, бел. руб.	889989,92	380756,19
Затраты на сооружение линии, бел. руб.	120750	185850
Ежегодные издержки, бел. руб.	16318,32	12482,70
Приведенные затраты, бел. руб.	238815,80	107671,74
Себестоимость передачи электроэнергии, бел. руб./кВт·ч	0,000475	0,000363
Удельные капитальные затраты, бел. руб./кВт	119,493	51,121
Чистый дисконтированный доход	13079,592	32762,386
Рентабельность	1,0183	1,107
Средний показатель себестоимости, бел. руб./год	549,30	2299,53
Продолжительность строительства, дни	115	177

Расчет введенного среднего показателя себестоимости свидетельствует о том, что эксплуатация и последующая амортизация сети с композитными опорами в течение всего срока службы стоек гораздо выгоднее, чем в случае с железобетонными стойками: 549,30 против 2299,53 бел. руб./год.

Схема «4/1» повышает надежность механической части воздушной линии электропередачи и электроснабжения потребителей в тяжелых погодных условиях, сокращает издержки на эксплуатацию. Также предлагаемая конструкция позволяет значительно ускорить возведение ВЛ. При возможном повреждении стоек линия может продолжать функционирование в нормальном режиме до устранения бригадой электромонтеров дефектов. Позволяет обеспечить надежное электроснабжение потребителя при актах вандализма на линии за счет применения деревянных опор.

На основании положительного опыта выполнения конструкторских работ западных специалистов, а также опыта использования композитных опор можно судить о необходимости внедрения схем с применением композитных опор и в Беларуси.

ВЫВОД

Предлагаемый метод сооружения воздушных линий электропередачи может быть применен в электрических сетях Республики Беларусь как для возведения новых воздушных линий, так и для ремонта поврежденных

участков трасс линий. Внедрение этого метода снизит показатель потока отказов и ущерба от недоотпуска электроэнергии, соответственно повысит надежность электроснабжения потребителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колтарп, С. Стоя в полный рост наперекор погоде. Суровая погода подтверждает решение сетевой компании установить стеклопластиковые опоры / С. Колтарп, Т. Вайд // Воздушные линии. 2015. № 1. С. 60–64.
2. Преображенский, А. И. Стеклопластики – свойства, применение, технологии / А. И. Преображенский // Главный механик. 2010. № 5. С. 27–36.
3. Боков, Г. С. Распределительные электрические сети. Оптимизация технологических и технических условий развития / Г. С. Боков, А. Н. Жулев // Новости электротехники. 2012. Вып. 76. С. 22–25.
4. Перельгин, Л. М. Дреесиноведение / Л. М. Перельгин. М.: Лесная промышленность, 1971. 82 с.
5. Бирюков, Н. П. Опоры для воздушных линий 0,4–10 кВ. Мнение эксплуатационника / Н. П. Бирюков // Новости электротехники. 2003. Вып. 24. С. 57–59.
6. Дубина, А. А. Новые конструкции полимерных стоек для опор ВЛ в РФ и Украине / А. А. Дубина // Воздушные линии. 2011. № 3. С. 27–31.
7. Бочаров, Ю. Н. К вопросу о композитных опорах воздушных линий / Ю. Н. Бочаров, В. В. Жук // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. 2012. Вып. 4–1. С. 78–85.
8. Файбисович, Д. Л. Справочник по проектированию электрических сетей / Д. Л. Файбисович, И. Г. Карапетян, И. М. Шапиро. М.: ЭНАС, 1985. 303 с.
9. Готвянский, В. В. Типовые технологические карты на установку свободностоящих порталных промежуточных опор типа ПБ 330-7Н, ПБ 500-5Н и ПБ 500-7Н и модификации базовой конструкции / В. В. Готвянский // Воздушные линии. 2011. № 3. С. 16–18.
10. Крюков, К. П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи / К. П. Крюков, Б. П. Новгородцев. Л.: Энергия, 1979. 312 с.

Поступила 28.05.2018 Подписана в печать 11.09.2018 Опубликована онлайн 30.01.2019

REFERENCES

1. Koltarp S., Waid T. (2015) Standing Tall Against the Weather. Severe Weather Justifies the Decision of the Network Company to Install Fiberglass Poles. *Vozdushnye Liniiii* [Overhead Lines], (1), 60–64 (in Russian).
2. Preobrazhenskii A. N. (2010) Fiberglass: Properties, Applications, Technologies. *Glavnyi Mekhanik = Chief Mechanical Engineer*, (5), 27–36 (in Russian).
3. Bokov G. S., Zhulev A. N. (2012) Distribution Electrical Networks. Optimization of Technological and Technical Conditions of Development. *Novosti Elektrotekhnikii = Electrical Engineering News*, (76), 22–25 (in Russian).
4. Perelygin L. M. (1971) *Wood Science*. Moscow, Lesnaya Promyshlennost' Publ. 82 (in Russian).
5. Biryukov N. P. (2003) Supports for Overhead Lines of 0.4–10 kV. Operator's Opinion. *Novosti Elektrotekhnikii = Electrical Engineering News*, (24), 57–59 (in Russian).
6. Dubina A. A. (2011) *New Designs of Polymeric Racks for Poles of Overhead Lines in the Russian Federation and Ukraine*. *Vozdushnye Liniiii* [Overhead Lines], (3), 27–31 (in Russian).
7. Bocharov Yu. N., Zhuk V. V. (2012) *Towards the Problem of Composite Overhead Line Supports*. *Trudy Kol'skogo Nauchnogo Tsentra RAN. Energetika* [Proceedings of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], (4–1), 78–85 (in Russian)
8. Faibisovich D. L., Karapetyan I. G., Shapiro I. M. (1985) *Reference Book for the Design of Electrical Networks*. Moscow, ENAS Publ. 303 (in Russian).
9. Gotvyanskii V. V. (2011) Typical Process Charts for the Installation of Free-Bearing Portal Intermediate Supports of PB 330-7H, PB 500-5N and PB 500-7H Type as Well as the Modification of the Basic Structure. *Vozdushnye Liniiii* [Overhead Lines], (3), 16–18 (in Russian).
10. Kryukov K. P., Novgorodtsev B. P. (1979) *Constructions and Mechanical Calculation of Power Lines*. Leningrad, Energiya Publ. 312 (in Russian).

Received: 28 May 2018 Accepted: 11 September 2018 Published online: 30 January 2019

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-24-36>

УДК 621.315.176

Механический расчет гибких проводов воздушных линий с заградительными шарами в различных климатических режимах

Ю. В. Бладыко¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Климатические условия и нагрузки на провода и тросы воздушных линий рассчитываются согласно техническому кодексу установившейся практики ТКП 339–2011 и Правилам устройства электроустановок (седьмое издание). Авиационные заградительные шары-маркеры рассматриваются как сосредоточенные нагрузки, действующие на провод. В статье представлен механический расчет гибких проводов пролета воздушных линий, в котором устанавливаются заградительные шары. Приведены формулы определения стрел провеса при различном числе заградительных шаров как функции от их числа и коэффициента сосредоточенных сил. При этом учитываются разность высот подвеса, натяжные гирлянды изоляторов, ветровые и гололедные нагрузки. Получены уравнения состояния, учитывающие весовые и ветровые нагрузки на провод, а также коэффициенты нагрузки в двух плоскостях, зависящие от числа заградительных шаров. Выполнены расчеты стрел провеса и тяжений при различной нагрузке пролета. При действии ветровой и гололедной нагрузок тяжение и стрелы провеса возрастают, в гололедном режиме тяжение вышло за пределы допустимого значения. Рассмотрен случай появления дополнительной сосредоточенной нагрузки в пролете.

Ключевые слова: стрела провеса, тяжение, уравнение состояния, пролет, ветер, гололед, коэффициент нагрузки

Для цитирования: Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких проводов воздушных линий с заградительными шарами в различных климатических режимах / Ю. В. Бладыко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 1. С. 24–36. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-24-36>

Mechanical Calculation of Flexible Wires of Overhead Lines with Aerial Barrage Balls in Different Climatic Regimes

Y. V. Bladyko¹⁾

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

Abstract. Climatic conditions and loads on wires and cables of overhead lines are calculated in accordance with the Technical Code of the Established Practice of TCP 339–2011 and the seventh

Адрес для переписки

Бладыко Юрий Витальевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-71-93
eie@bntu.by

Address for correspondence

Bladyko Yuri V.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-71-93
eie@bntu.by

edition of Electrical Installation Rules. Aviation aerial barrage balls are considered as concentrated loads acting on the wire. The article deals with the mechanical calculation of flexible wires of overhead lines, in which barrage balls warning spheres are installed. The formulas for determining the sag are given for a different number of barrage balls as a function of their number and the coefficient of concentrated forces. This takes into account the difference in suspension heights, tension insulators strings, wind and ice loads. Equations of state are obtained that took into account the weight and wind loads on the wire, as well as the load factors in two planes, depending on the number of barrage balls. Calculations of sag and tension for different span loads have been performed. With the action of wind and ice loads, the tensions and sags increase, in the ice regime the tension has exceeded the permissible value. The case of the appearance of an additional concentrated load in the span is considered.

Keywords: sag, tension, equation of state, span, wind, ice, load factor

For citation: Bladyko Y. V. (2019) Mechanical Calculation of Flexible Wires of Overhead Lines with Aerial Barrage Balls in Different Climatic Regimes. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (1), 24–36. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-24-36> (in Russian)

Введение

Согласно ТКП 339–2011 [1], введенному в Республике Беларусь с 1 декабря 2011 г., при расчете воздушных линий (ВЛ) и их элементов должны учитываться климатические условия – ветровое давление, толщина стенки гололеда, температура воздуха, степень агрессивного воздействия окружающей среды, интенсивность грозовой деятельности, пляска проводов и тросов, вибрация. Данный технический кодекс установившейся практики утвержден постановлением Министерства энергетики Республики Беларусь от 23 августа 2011 г. № 44, внесен Государственным комитетом по стандартизации Республики Беларусь в Реестр государственной регистрации от 16.09.2011 № 1087. Параграф 5.3 «Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1 кВ» [1] введен взамен параграфа 2.5 «Воздушные линии электропередачи напряжением 1 кВ» Правил устройства электроустановок (ПУЭ, шестое издание) [2], действовавших до этого в Беларуси.

Параграф 5.3.5 «Климатические условия и нагрузки» [1] в части расчетов ветровых и гололедных нагрузок полностью совпадает с параграфом «Климатические условия и нагрузки» ПУЭ (седьмое издание) [3], утвержденных приказом Министерства энергетики России от 08.07.2002 № 204 и введенных в Российской Федерации с 01.01.2003.

Однако ни один из вышеперечисленных документов не учитывает ветровые и гололедные нагрузки на все конструктивные элементы ВЛ. Отсутствует расчет ветровой нагрузки на гирлянды изоляторов, покрытые гололедом. Не показано, как рассчитывать нагрузки от ветра и гололеда на распорки, авиационные заградительные шары-маркеры, шлейфы и другие сосредоточенные нагрузки. Цель статьи – описание методики механического расчета проводов и тросов воздушных линий с заградительными шарами в различных режимах климатических воздействий. Авиационные заградительные шары рассматриваются как сосредоточенные нагрузки, которые нельзя заменять распределенными по длине пролета, так как это приводит к большим погрешностям в расчетах стрел провеса [4–6].

По условиям воздействия ветра на пролет ВЛ, согласно [1], различают три типа местности:

А – открытые побережья озер, водохранилищ и другие открытые местности (в России – еще открытые побережья морей, пустыни, степи, лесостепи, тундра [3]);

В – городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой не менее $2/3$ высоты опор;

С – городские районы с застройкой зданиями высотой более 25 м, просеки в лесных массивах с высотой деревьев более высоты опор, орографически защищенные извилистые и узкие склоновые долины и ущелья.

Рассмотрим определение климатических нагрузок, действующих на провода и тросы, при расчете по методу допускаемых напряжений, а также варианты расчета стрел провеса и решения уравнения состояния провода в различных конструкциях.

Расчет ветровой нагрузки на провода и тросы

Нормативная погонная ветровая нагрузка на провода и тросы, действующая перпендикулярно проводу (тросу), для каждого рассчитываемого условия определяется по формуле [1]

$$q_w^H = \alpha_w K_l C_x [K_w W] F \sin^2 \varphi, \quad (1)$$

где α_w – коэффициент, учитывающий неравномерность ветрового давления по пролету ВЛ; K_l – коэффициент, учитывающий влияние длины пролета на ветровую нагрузку; C_x – коэффициент лобового сопротивления; K_w – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления в зависимости от типа местности и высоты расположения приведенного центра тяжести проводов или тросов; W – нормативное ветровое давление в рассматриваемом режиме, зависящее от ветрового района; $[K_w W]$ – округление до целого; F – площадь продольного диаметрального сечения 1 м провода (при гололеде – с учетом условной толщины стенки гололеда b_y); φ – угол между направлением ветра и осью ВЛ (при расчете проводов и тросов ветер следует принимать направленным под углом 90° к оси ВЛ).

Высота расположения приведенного центра тяжести проводов или тросов $h_{пр}$ для габаритного пролета

$$h_{пр} = h_{ср} - \frac{2}{3} f,$$

где $h_{ср}$ – среднеарифметическое значение высоты крепления проводов к изоляторам или среднеарифметическое значение высоты крепления тросов к опоре, отсчитываемое от отметок земли в местах установки опор; f – стрела провеса провода или троса в середине пролета при высшей температуре.

Ветровое давление определяется по формуле

$$W = 40 \left[\frac{v^2}{64} \right],$$

где v – скорость ветра.

Площадь продольного диаметрального сечения 1 м провода (троса) с гололедом [1]

$$F = (d + 2[K_i K_d b_y]) \cdot 10^{-3},$$

где d – диаметр провода, мм; K_i – коэффициент, учитывающий изменение толщины стенки гололеда по высоте; K_d – коэффициент, учитывающий изменение толщины стенки гололеда в зависимости от диаметра провода; b_y – условная толщина стенки гололеда, мм (принимается по региональному районированию ветровых нагрузок при гололеде), при отсутствии региональных карт и данных наблюдений $b_y = b_s$; b_s – нормативная толщина стенки гололеда, мм (следует принимать в соответствии с картой районирования территории по толщине стенки гололеда).

Расчетная ветровая нагрузка на провода (тросы) при механическом расчете проводов и тросов по методу допускаемых напряжений

$$q_z = q_W^H \gamma_{hw} \gamma_p \gamma_f,$$

где γ_{hw} – коэффициент надежности по ответственности; γ_p – региональный коэффициент по ветру; γ_f – коэффициент надежности по ветровой нагрузке.

Расчет гололедных нагрузок на провода и тросы

Нормативная линейная гололедная нагрузка на 1 м провода и трос определяется по формуле [1]

$$q_{гол}^H = \pi b(d + b) \rho g \cdot 10^{-6},$$

где $b = [K_i K_d b_s]$ – толщина стенки гололеда с учетом поправок на высоту и диаметр провода, с округлением до целого; ρ – плотность льда, принимаемая в СНГ 900 кг/м³; g – ускорение свободного падения.

Расчетная линейная гололедная нагрузка на 1 м провода (троса) при механическом расчете проводов и тросов по методу допускаемых напряжений [1]

$$q_{г.п} = q_{гол}^H \gamma_{hw} \gamma_p \gamma_f \gamma_d,$$

где γ_p – региональный коэффициент по гололеду; γ_f – коэффициент надежности по гололедной нагрузке; γ_d – коэффициент условий работы, равный 0,5.

Расчет результирующей весовой нагрузки на провод

В общем случае результирующая погонная весовая нагрузка на провод, покрытый гололедом

$$q_y = N(q + q_{г.л.}) + q_p(1 + 0,01b),$$

где N – число расщепленных проводов в фазе (при отсутствии расщепления и для тросов $N = 1$); q – погонный вес одного провода (троса); $q_p = P_p/l_p$ – распределенная весовая нагрузка от распорок (при отсутствии расщепления и для тросов $q_p = 0$); P_p – вес распорок в узле; l_p – расстояние между распорками.

Увеличение веса распорок, покрытых гололедом, на $0,01bq_p$ принято согласно Указаниям по механическому расчету гибкой ошиновки ОРУ 35–500 кВ.

Расчет нагрузок на гирлянду изоляторов

Расчетная ветровая нагрузка на 1 м гирлянды изоляторов определяется по формуле [1]

$$q_{гз} = C_x [K_w W] F_n \gamma_{нв} \gamma_p \gamma_f,$$

где C_x – коэффициент лобового сопротивления цепи изоляторов, $C_x = 1,2$; γ_f – коэффициент надежности по ветровой нагрузке, $\gamma_f = 1,3$; F_n – площадь диаметрального сечения 1 м цепи гирлянды изоляторов

$$F_n = 0,7 D_n H_n n_n N_n \cdot 10^{-6} / l_g;$$

D_n – диаметр тарелки изолятора, мм; H_n – строительная высота изолятора, мм; n_n – число изоляторов в цепи; N_n – число цепей изоляторов в гирлянде; l_g – длина гирлянды изоляторов.

Погонная весовая нагрузка на гирлянду изоляторов, покрытую гололедом

$$q_{гв} = P_g N_n (1 + K_{гг}) / l_g,$$

где P_g – вес одной цепи гирлянды изоляторов; $K_{гг}$ – коэффициент увеличения веса гирлянды изоляторов, покрытой гололедом (согласно Указаниям по механическому расчету гибкой ошиновки ОРУ 35–500 кВ $K_{гг} = 0$ – при отсутствии гололеда, $K_{гг} = 0,3$ – при наличии гололеда, $K_{гг} = 0,5$ – при толщине стенки гололеда $b > 10$ мм).

В ранних версиях программы механического расчета проводов MR2.20 учитывалось увеличение площади диаметрального сечения гирлянды изоляторов, покрытой гололедом [7]. Гирлянда представлялась цилиндром, а увеличение ее веса из-за гололеда давало равномерно распределенное по длине гирлянды увеличение диаметра цилиндра. В настоящее время это уточнение не применяется, так как расчетная нагрузка на гирлянду от ветрового действия возросла за счет использования коэффициента лобового сопротивления цепи изоляторов и коэффициента надежности по ветровой нагрузке, больших единицы.

Расчет нагрузок на заградительные шары

При определении суммарной ветровой нагрузки на заградительные шары P_z предлагается использовать формулу (1) с подстановкой площади продольного диаметрального сечения шаров с равномерно распределенным по поверхности гололедом

$$F_{\text{ш}} = \pi n(D + 2b)^2 \cdot 10^{-6} / 4,$$

где D – диаметр заградительного шара, мм; n – число заградительных шаров в пролете.

Тогда ветровая нагрузка на заградительные шары

$$P_z = \alpha_w K_l C_x [K_w W] F_{\text{ш}}.$$

Вес заградительных шаров, равномерно покрытых гололедом:

$$P_y = P + \frac{\pi}{6} \cdot [(D + 2b)^3 - D^3] n \rho g \cdot 10^{-9} = P + \pi b [D^2 + 2Db + 4b^2 / 3] n \rho g \cdot 10^{-9},$$

где P – суммарный вес заградительных шаров в пролете.

Расчет троса с заградительными шарами

Максимальная стрела провеса троса с заградительными шарами [4]

$$f_0 = y_0 = \frac{ql^2 K_f}{8H}, \quad (2)$$

где q – погонный вес провода; l – длина пролета; H – тяжесть в проводе (горизонтальная составляющая); K_f – коэффициент увеличения стрелы провеса, обусловленный наличием заградительных шаров,

$$K_f = 1 + K_p \left(1 + \frac{1}{n} \right);$$

$K_p = \frac{P}{ql}$ – коэффициент сосредоточенных сил; P – суммарный вес заградительных шаров в пролете; n – число заградительных шаров, равномерно расположенных по длине пролета.

Уравнение состояния троса для перехода к другому режиму, один из которых исходный (с индексом 0), имеет вид

$$\alpha_y H - \frac{(qK)^2 l^2}{24H^2} + \alpha t = \alpha_y H_0 - \frac{(q_0 K_0)^2 l^2}{24H_0^2} + \alpha t_0, \quad (3)$$

где $\alpha_y = \frac{1}{EA}$ – коэффициент упругого удлинения провода; E – модуль упругости провода; A – сечение провода; α – коэффициент температурного удлинения провода; t – температура провода; K – коэффициент нагрузки [4],

$$K^2 = 1 + 2 \cdot \left(1 + \frac{1}{n+1} \right) K_p + \left(1 + \frac{2}{n} \right) K_p^2.$$

Пролет с двумя натяжными гирляндами изоляторов

Вводим обозначения:

$K_B = \frac{q_r}{q}$ – кратность веса натяжной гирлянды изоляторов относительно

веса провода;

$K_r = \frac{l_r}{l}$ – кратность длины натяжной гирлянды изоляторов относительно

длины пролета.

Тогда коэффициент, учитывающий наличие натяжных гирлянд [5]:

$$\delta = \left(\frac{q_r}{q} - 1 \right) \cdot \left(\frac{l_r}{l} \right)^2 = (K_B - 1) K_r^2.$$

Коэффициент увеличения стрелы провеса, обусловленный наличием двух натяжных гирлянд изоляторов и заградительных шаров [5]:

$$K_f = 1 + 4\delta + K_p \left(1 + \frac{1}{n} \right).$$

Уравнение состояния провода имеет вид (3) с подстановкой коэффициента нагрузки

$$K^2 = (1 - 2K_r)(1 + 4K_r) + \frac{1}{1 - 2K_r} \left[12K_B K_r^2 \left(1 - 2K_r + \frac{2}{3} K_B K_r \right) + 2K_p \left(1 + 6\delta + \frac{1}{n+1} \right) + K_p^2 \left(1 + \frac{2}{n} \right) \right].$$

Совместное действие вертикальных и горизонтальных нагрузок

При n заградительных шарах, равномерно расположенных вдоль пролета, максимальные отклонения в двух плоскостях определяются по формулам:

$$y_0 = \frac{q_y l^2 K_{fy}}{8H}; \quad z_0 = \frac{q_z l^2 K_{fz}}{8H}, \quad (4)$$

где q_y, q_z – погонная нагрузка на провод по осям y, z ; K_{fy}, K_{fz} – коэффициент увеличения отклонений по осям y, z , обусловленный наличием сосредоточенных сил и гирлянд изоляторов:

$$K_{fy} = 1 + 4\delta_y + K_{py} \left(1 + \frac{1}{n} \right); \quad K_{fz} = 1 + 4\delta_z + K_{pz} \left(1 + \frac{1}{n} \right);$$

$$\delta_y = \left(\frac{q_{ry}}{q_y} - 1 \right) \cdot \left(\frac{l_r}{l} \right)^2 = (K_{By} - 1) K_r^2; \quad \delta_z = \left(\frac{q_{rz}}{q_z} - 1 \right) \cdot \left(\frac{l_r}{l} \right)^2 = (K_{Bz} - 1) K_r^2;$$

$$K_{Py} = \frac{P_y}{q_y l}; \quad K_{Pz} = \frac{P_z}{q_z l}; \quad K_{By} = \frac{q_{ry}}{q_y}; \quad K_{Bz} = \frac{q_{rz}}{q_z}; \quad K_r = \frac{l_r}{l};$$

q_{ry}, q_{rz} – погонная нагрузка на натяжную гирлянду изоляторов от веса и ветра; P_y, P_z – суммарная нагрузка от заградительных шаров по осям y, z .

Максимальная стрела провеса может быть найдена по формуле

$$f_0 = \sqrt{y_0^2 + z_0^2}. \quad (5)$$

Уравнение состояния провода (троса) записывается в виде [6]

$$\alpha_y H - \frac{\Sigma(qK)^2 l^2}{24H^2} + \alpha t = \alpha_y H_0 - \frac{\Sigma(q_0 K_0)^2 l^2}{24H_0^2} + \alpha t_0, \quad (6)$$

где $\Sigma(qK)^2 = (q_y K_y)^2 + (q_z K_z)^2$;

$$K_y^2 = (1 - 2K_r) \cdot (1 + 4K_r) + \frac{1}{1 - 2K_r} \cdot \left[12K_{By} K_r^2 \left(1 - 2K_r + \frac{2}{3} K_{By} K_r \right) + 2K_{Py} \left(1 + 6\delta_y + \frac{1}{n+1} \right) + K_{Py}^2 \left(1 + \frac{2}{n} \right) \right];$$

$$K_z^2 = (1 - 2K_r) \cdot (1 + 4K_r) + \frac{1}{1 - 2K_r} \cdot \left[12K_{Bz} K_r^2 \left(1 - 2K_r + \frac{2}{3} K_{Bz} K_r \right) + 2K_{Pz} \left(1 + 6\delta_z + \frac{1}{n+1} \right) + K_{Pz}^2 \left(1 + \frac{2}{n} \right) \right].$$

При наличии натяжных гирлянд изоляторов и учете ветровой нагрузки погрешность расчета возрастает из-за несовпадения формы системы «гирлянда изоляторов – провод» с параболой, отклонения составляющих проходят в разных плоскостях. В [8] доказано увеличение погрешности с увеличением длины гирлянды изоляторов. Точное определение возможно при применении векторно-параметрического метода расчета статики [8, 9], который реализован в компьютерных программах механического расчета [10].

Расположение точек подвеса провода на разных высотах

При разных высотах точек подвеса провода стрелы провеса определяются тем же путем, что и при одинаковой высоте точек подвеса, так как формула балочных реакций в обоих случаях имеет одинаковую структуру, причем нагрузки могут быть приняты с учетом уклона. В формулы вместо длины гирлянды l_r подставляется $l_0 = l_r \cos\theta$, где θ – угол наклона пролета, $\operatorname{tg}\theta = h/l$; h – разность высот подвеса проводов.

Максимальная стрела провеса определяется по (2), в которой коэффициент увеличения стрелы провеса находится из выражения [5]

$$K_f = \frac{1 + 4\delta + K_p \left(1 + \frac{1}{n}\right)}{\cos \theta},$$

$$\text{где } \delta = \left(\frac{q_r}{q} - 1\right) \cdot \left(\frac{l_0}{l}\right)^2 = (K_B - 1)K_r^2; \quad K_B = \frac{q_r}{q}; \quad K_r = \frac{l_0}{l} = \frac{l_r \cos \theta}{l}; \quad K_p = \frac{P \cos \theta}{ql}.$$

Уравнение состояния провода для перехода к другому режиму, один из которых исходный (с индексом 0), имеет вид

$$\frac{\alpha_y H}{\cos \theta} - \frac{(qK)^2 l^2}{24H^2} + \alpha t = \frac{\alpha_y H_0}{\cos \theta} - \frac{(q_0 K_0)^2 l^2}{24H_0^2} + \alpha t_0,$$

где

$$K^2 = (1 - 2K_r) \cdot (1 + 4K_r) + \frac{1}{1 - 2K_r} \cdot \left[12K_B K_r^2 \left(1 - 2K_r + \frac{2}{3} K_B K_r\right) + 2K_p \left(1 + 6\delta + \frac{1}{n+1}\right) + K_p^2 \left(1 + \frac{2}{n}\right) \right].$$

Совместное действие вертикальных и горизонтальных нагрузок при расположении точек подвеса провода на разных высотах

При совместном действии вертикальных и горизонтальных нагрузок стрелы провеса и горизонтальные отклонения находят независимо в двух взаимно перпендикулярных плоскостях [5]. При n заградительных шарах, равномерно расположенных вдоль пролета, максимальные отклонения в двух плоскостях определяются по формулам (4), в которые подставляются коэффициенты увеличения стрелы провеса:

$$K_{fy} = \frac{1 + 4\delta_y + K_{py} \left(1 + \frac{1}{n}\right)}{\cos \theta}; \quad K_{fz} = \frac{1 + 4\delta_z + K_{pz} \left(1 + \frac{1}{n}\right)}{\cos \theta};$$

$$\delta_y = \left(\frac{q_{ry}}{q_y} - 1\right) \cdot \left(\frac{l_0}{l}\right)^2 = (K_{By} - 1)K_r^2; \quad \delta_z = \left(\frac{q_{rz}}{q_z} - 1\right) \cdot \left(\frac{l_0}{l}\right)^2 = (K_{Bz} - 1)K_r^2;$$

$$K_{By} = \frac{q_{ry}}{q_y}; \quad K_{Bz} = \frac{q_{rz}}{q_z}; \quad K_r = \frac{l_0}{l} = \frac{l_r \cos \theta}{l}; \quad K_{py} = \frac{P_y \cos \theta}{q_y l}; \quad K_{pz} = \frac{P_z \cos \theta}{q_z l}.$$

Максимальная стрела провеса может быть найдена по формуле (5). Уравнение состояния провода (троса) записывается в виде [5]

$$\frac{\alpha_y H}{\cos \theta} - \frac{\left[(q_y K_y)^2 + (q_z K_z)^2 \right] l^2 k_\phi^2}{24 H^2} + \alpha t =$$

$$= \frac{\alpha_y H_0}{\cos \theta} - \frac{\left[(q_{y0} K_{y0})^2 + (q_{z0} K_{z0})^2 \right] l^2 k_{\phi 0}^2}{24 H_0^2} + \alpha t_0,$$

где $k_\phi = \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta \sin^2 \phi}$; $\operatorname{tg} \phi = \frac{q_z K_z}{q_y K_y}$;

$$K_y^2 = (1 - 2K_r) \cdot (1 + 4K_r) +$$

$$+ \frac{1}{1 - 2K_r} \cdot \left[12K_{By} K_r^2 \left(1 - 2K_r + \frac{2}{3} K_{By} K_r \right) + 2K_{Py} \left(1 + 6\delta_y + \frac{1}{n+1} \right) + K_{Py}^2 \left(1 + \frac{2}{n} \right) \right];$$

$$K_z^2 = (1 - 2K_r) \cdot (1 + 4K_r) +$$

$$+ \frac{1}{1 - 2K_r} \cdot \left[12K_{Bz} K_r^2 \left(1 - 2K_r + \frac{2}{3} K_{Bz} K_r \right) + 2K_{Pz} \left(1 + 6\delta_z + \frac{1}{n+1} \right) + K_{Pz}^2 \left(1 + \frac{2}{n} \right) \right].$$

При углах $\theta \leq 8^\circ$ для вычисления коэффициентов нагрузки и коэффициентов увеличения стрел провеса можно пользоваться формулами (4)–(6). При таких углах погрешность от неучета наклона не превышает 1 % ($\cos 8^\circ = 0,99$).

Полученные формулы расчета стрел провеса и тяжений проводов с заградительными шарами могут быть распространены на другие конструкции с сосредоточенными нагрузками. Заменять их распределенной нагрузкой простым делением суммарных нагрузок на длину пролета можно в случае их большого количества и малого веса.

Результаты механического расчета провода с заградительными шарами

Расчеты выполнялись для следующих исходных данных: длина пролета $l = 400$ м; разность высот подвеса $h = 20$ м; провод 264/34 ACSR с погонным весом $q = 0,98$ даН/м, площадью поперечного сечения $A = 297,8$ мм², модулем упругости $E = 7400$ даН/мм²; исходное тяжение в пролете без шаров $H = 1490$ даН при температуре $t = 10$ °С, без ветра и гололеда; суммарный вес заградительных шаров в пролете $P = 35$ даН ($n = 7$ шаров по 5 даН диаметром $D = 0,6$ м). Рассматривался пролет с разными высотами подвеса, ветром и гололедом, с изменением тяжения в разных режимах климатических нагрузок и при различном нагружении пролета. В исходном режиме без шаров задавалось тяжение провода (троса), затем в пролете крепились шары. Пример расчета приведен в табл. 1.

Таблица 1

Результаты механического расчета троса с заградительными шарами

The results of mechanical calculation of a cable with aerial barrage balls

Конфигурация пролета	Климатические условия	Коэффициент		Тяжение, даН	Максимальная стрела провеса, м
		нагрузки	увеличения стрелы провеса		
Без шаров	$v = 0$ м/с; $b = 0$ мм; $t = 10$ °С	$K_y = 1,000$	$K_{fy} = 1,001$	1490	13,19
Суммарный вес 7 шаров равномерно распределен по пролету		$K_y = 1,089$	$K_{fy} = 1,089$	1608	13,31
Шары в центре, суммарный вес 35 даН		$K_y = 1,136$	$K_{fy} = 1,180$	1670	13,87
7 шаров через 50 м, суммарный вес 35 даН	$v = 0$ м/с; $b = 0$ мм; $t = 10$ °С	$K_y = 1,100$	$K_{fy} = 1,103$	1623	13,35
	$v = 0$ м/с; $b = 0$ мм; $t = 75$ °С			1410	15,37
	$v = 0$ м/с; $b = 0$ мм; $t = -40$ °С			1860	11,64
	$v = 30$ м/с; $b = 0$ мм; $t = 10$ °С	$K_y = 1,100$;	$K_{fy} = 1,103$;	2865	14,57
	$v = 15$ м/с; $b = 0$ мм; $t = 10$ °С	$K_z = 1,285$	$K_{fz} = 1,291$	1740	13,46
	$v = 15$ м/с; $b = 20$ мм; $t = -5$ °С	$K_y = 1,164$; $K_z = 1,106$	$K_{fy} = 1,167$; $K_{fz} = 1,109$	4884	15,92
7 шаров через 50 м, суммарный вес 35 даН, один человек весом 100 даН в центре	$v = 0$ м/с; $b = 0$ мм; $t = 10$ °С	$K_y = 1,499$	$K_{fy} = 1,612$	2130	14,87
Один человек весом 100 даН в центре, без шаров		$K_y = 1,400$	$K_{fy} = 1,510$	2006	14,79
Один человек весом 100 даН на расстоянии 100 м, без шаров		$K_y = 1,311$	$K_{fy} = 1,255$	1895	13,01

При числе шаров семь и более можно их вес равномерно распределять по пролету. При этом абсолютная погрешность в определении стрелы провеса составляет около 4 см при погрешности в тяжении примерно 1 %.

Перемещение шаров вдоль пролета приводит к изменению тяжения и стрел провеса. Смещение всех шаров к центру увеличивает тяжение на 3 %, а стрелу провеса – на 52 см (при неизменном тяжении – на 90 см).

При действии ветровой и гололедной нагрузок тяжение и стрелы провеса возрастают, в гололедном режиме тяжение вышло за пределы допустимого значения. При уменьшении температуры отмечаются рост тяжения и уменьшение стрелы провеса.

При увеличении веса сосредоточенной нагрузки тяжение и стрелы провеса возрастают. Для примера в табл. 1 включен расчет, когда в пролете появляется дополнительная нагрузка в виде человека весом 100 даН. Такая нагрузка при наличии заградительных шаров увеличит тяжение на 507 даН (на 31 %), а стрелу провеса – на 1,52 м (на 11 %). При отсутствии заградительных шаров появление нагрузки в виде человека весом 100 даН увеличит тяжение на 516 даН (на 35 %), а стрелу провеса – на 1,6 м (на 12 %).

ВЫВОДЫ

1. Получены формулы для расчета климатических нагрузок от ветра и гололеда на провода (тросы), гирлянды изоляторов и заградительные шары.

2. В расчетах нагрузок от заградительных шаров нельзя их заменять распределенной простым делением суммарных нагрузок на длину пролета, так как это может привести к большой погрешности. Такая замена допустима только при количестве шаров семь и более. При их меньшем числе нужно учитывать как сосредоточенные нагрузки, применяя полученные коэффициенты увеличения стрел провеса и коэффициенты нагрузки.

3. Получены формулы для определения стрел провеса и отклонений провода при различном числе заградительных шаров как функции от их числа и коэффициента сосредоточенных сил K_p . При этом учитываются разность высот подвеса, натяжные гирлянды изоляторов, ветровые и гололедные нагрузки.

4. Получены уравнения состояния провода с учетом весовых и ветровых нагрузок при разных высотах подвеса, а также коэффициентов нагрузки в двух плоскостях, зависящие от числа заградительных шаров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемо-сдаточных испытаний: ТКП 339–2011 (02230). Минск: филиал «Информационно-издательский центр» ОАО «Экономэнерг», 2011. 593 с.
2. Правила устройства электроустановок. 6-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1986. 648 с.
3. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. М.: Энергосервис, 2009. 695 с.
4. Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов при замене сосредоточенных сил распределенной нагрузкой / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 2. С. 97–107. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-97-107>.
5. Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов при замене сосредоточенной нагрузки распределенной нагрузкой с учетом конструктивных элементов / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 3. С. 220–234. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-220-234>.
6. Сергей, И. И. Механический расчет гибких проводов воздушных линий с заградительными шарами / И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 4. С. 299–309. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-299-309>.
7. Стрелюк, М. И. Численный метод механического расчета гибких токопроводов электроустановок энергосистем / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений. 1995. № 3–4. С. 21–29.

8. Стрелюк, М. И. Численный метод расчета статики гибкой ошиновки ОРУ в различных режимах климатических воздействий / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений. 1983. № 8. С. 8–14.
9. Анализ действия гололедно-ветровых и электродинамических нагрузок в пролетах с произвольным расположением проводов / И. И. Сергей [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2012. № 1. С. 38–44.
10. Пакет компьютерных программ для механического и электродинамического расчета гибких токоведущих конструкций / И. И. Сергей [и др.] // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Минск: БНТУ, 2015. Вып. 66: Актуальные проблемы надежности систем энергетики: материалы Междунар. семинара имени Ю. Н. Руденко. С. 308–310.

Поступила 05.02.2018 Подписана в печать 24.04.2018 Опубликовано онлайн 30.01.2019

REFERENCES

1. TCP 339–2011 (02230) (2011) *Electrical Installations for Voltage up to 750 kV. Air Transmission Lines and Current Wires, Distribution and Transformer Substations, Electric and Battery Power Plants, Electrical Installations for Residential and Public Buildings. Rules of the Device and Protective Measures of Electrical Safety. Electricity Accounting. Norms of Acceptance Testing*. Minsk, IPC Economenergo Publ. 593 (in Russian).
2. *Electrical Installation Rules* (1986) 6th ed. Moscow, Energoatomizdat Publ. 648 (in Russian).
3. *Electrical Installation Rules* (2009) 7th ed. Moscow, Energoservis Publ. 695 (in Russian).
4. Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires when the Concentrated Forces are Replaced by a Distributed Load. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (2), 97–107 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-97-107>.
5. Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires when the Concentrated Loads are Replaced by Distributed Ones Taking into Account the Structural Elements. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 220–234 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-220-234>.
6. Sergey I. I., Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires of Overhead Lines with Barrage Balls. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (4), 299–309 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-299-309>.
7. Strelyuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Y. V. (1995) Numerical Method of Mechanical Calculation of Flexible Current Conductors of Power Plants of Power Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii* [Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions], (3–4), 21–29 (in Russian).
8. Strelyuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Y. V. (1983) Numerical Method for Calculating the Statics of a Flexible Busbars under Various Modes of Climatic Influences. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii* [Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions], (8), 8–14 (in Russian).
9. Sergey I. I., Bladyko Y. V., Panamarenka Y. G., Tsemekhman B. D., Tarasov V. E. (2012) Action Analysis for Ice, Wind and Electro Dynamic Loads in Spans with Arbitrary Wire Layout. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 38–44 (in Russian).
10. Sergei I. I., Ponomarenko E. G., Bladyko Yu. V., Klimkovich P. I (2015) Software Package for Mechanical and Electrodynamics Calculation of Flexible Current-Carrying Structures. *Metodicheskie Voprosy Issledovaniya Nadezhnosti Bol'shikh Sistem Energetiki. Vyp. 66: Aktual'nye Problemy Nadezhnosti Sistem Energetiki: Materialy Mezhdunarodnogo Seminara imeni Yu. N. Rudenko* [Methodical Problems of Research of Reliability of Big Systems of Power Engineering, Iss. 66: Actual Problems of the Reliability of Energy Systems: Materials of the International Seminar named of Yu. N. Rudenko]. Minsk, Belarusian National Technical University, 404–410 (in Russian).

Received: 5 February 2018

Accepted: 24 April 2018

Published online: 30 January 2019

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-37-46>

УДК 621.313.322

Математическая модель совместного расчета электромагнитного поля и нагревов торцевой зоны мощного турбогенератора

О. Г. Кенсницкий¹⁾, Д. И. Хвалин¹⁾, К. А. Кобзарь²⁾

¹⁾Институт электродинамики Национальной академии наук Украины (Киев, Украина),

²⁾Государственное предприятие завод «Электротяжмаш» (Харьков, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Разработана квазитрехмерная полевая математическая модель электромагнитного поля и теплообменных процессов в торцевой зоне мощного турбогенератора. Модель занимает промежуточное положение между дву- и трехмерными решениями и построена на численных расчетах в поперечном и продольном сечениях турбогенератора, взаимосвязанных при помощи комплекса граничных условий. На первом этапе рассматривается двумерная полевая модель электромагнитного поля поперечного сечения центральной зоны турбогенератора. Затем с учетом распределения поля в центральной части моделируется магнитное поле в продольном сечении. Учитывая симметрию машины вдоль осевого и радиального направлений, расчетная область торцевой зоны рассматривается в виде половины сечения ротора вдоль его оси и сечения зубца сердечника статора в тангенциальном направлении (по окружности). Принимая полученное в режиме нагрузки машины распределение электромагнитных параметров как исходные данные, определены тепловые потери в элементах и узлах торцевой зоны. В результате решения совместной задачи расчета электромагнитного поля и теплообменных процессов получено распределение нагревов не только на поверхности, но и внутри конструктивных деталей концевой зоны. В частности, установлено, что максимальная температура 97,3 °С имеет место в зубцовой зоне крайнего пакета сердечника статора. Это объясняется совместным воздействием основного радиального поля, аксиального потока рассеяния лобовых частей обмотки статора и ротора, а также «выпучиванием» части основного потока из воздушного зазора. Кроме того, эффект экранирования нажимной плиты является причиной локальной концентрации поля в зубцовой зоне крайнего пакета. Представленная модель позволяет уже на стадии проектирования оценить эффективность конструктивных решений по формированию торцевой зоны статора турбогенератора для разных режимов нагрузки машины, в том числе для режимов потребления реактивной мощности.

Ключевые слова: турбогенератор, математическая модель, сердечник статора, нажимная плита, торцевая зона, ротор, лобовая часть обмотки, поток рассеяния, электромагнитное поле, потери, температура

Для цитирования: Кенсницкий, О. Г. Математическая модель совместного расчета электромагнитного поля и нагревов торцевой зоны мощного турбогенератора / О. Г. Кенсницкий, Д. И. Хвалин, К. А. Кобзарь // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 1. С. 37–46. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-37-46>

Адрес для переписки

Кенсницкий Олег Георгиевич
Институт электродинамики
Национальной академии наук Украины
просп. Перемоги, 56
03057, г. Киев, Украина
Тел.: +38 044 456-01-51
ied1@ied.org.ua

Address for correspondence

Kensytskyi Oleh H.
Institute of Electrodynamics
of the National Academy of Sciences of Ukraine
56 Peremogy Ave.,
03057, Kyiv, Ukraine
Tel.: +38 044 456-01-51
ied1@ied.org.ua

The Mathematical Model of Coupling Calculation the Electromagnetic Field and Heats of End Zone Powerful Turbogenerator

O. H. Kensitytskyi¹⁾, D. I. Hvalin¹⁾, K. O. Kobzar²⁾

¹⁾Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine),

²⁾State Enterprise Plant Electrotvazhmash (Kharkov, Ukraine)

Abstract. A quasi-three-dimensional field mathematical model of the electromagnetic field and heat transfer processes in end zone of a powerful turbogenerator has been developed. A model is the intermediate version between two-dimensional and three-dimensional solutions and is based on the numeral calculations in transversal and longitudinal sections of turbogenerator, interconnected by a complex of boundary conditions. On the first stage, a two-dimensional field model of the electromagnetic field in transversal section of central zone of a turbogenerator is considered. Then, taking into account the field distribution in central part, the magnetic field in longitudinal section is simulated. In response to the symmetry of the machine along axial and radial directions, the calculation area of end zone is considered as a half of the rotor section along its axis and the section of the stator core tooth in the tangential direction (circumferentially). Having taken the distribution of electromagnetic parameters obtained in the load mode of the machine as the initial data, the thermal losses in the elements and nodes of the end zone are determined. As a result of solving the joint problem of calculating the electromagnetic field and heat exchange processes, the distribution of heating has been obtained not only on the surface, but also inside the structural parts of the end zone. In particular, it has been found that the maximum temperature of 97.3 °C takes place in the tooth area of the end package of the stator core. This is explained by the combined effect of the main radial field, the axial leakage flux of the frontal portions of the stator and rotor windings, as well as by the “buckling” of a portion of the main flux out of the air gap. In addition, the pressure plate shielding effect is the cause of local field concentration in the toothed zone of the end package. The presented model makes it possible as early as at the design stage to evaluate the efficiency of design solutions for the formation of the end zone of the turbogenerator stator for different load modes of the machine, including the modes of consumption of reactive power.

Keywords: turbogenerator, mathematical model, stator core, press plate, end zone, rotor, windings frontal portion, leakage flux, electromagnetic field, losses, temperature

For citation: Kensitytskyi O. H., Hvalin D. I., Kobzar K. O. (2019) The Mathematical Model of Coupling Calculation the Electromagnetic Field and Heats of End Zone Powerful Turbogenerator. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (1), 37–46. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-37-46> (in Russian)

Введение

С повышением линейной нагрузки в торцевой зоне (ТЗ) мощного турбогенератора (ТГ) возрастают потери. При неудачном ее конструктивном исполнении и недостаточном охлаждении локальные (местные) нагревы отдельных элементов и узлов могут превышать предельно допустимые значения (например, 120 °C для стали пакетов сердечника статора).

Опубликовано немало работ, направленных на изучение электромагнитного поля в ТЗ ТГ [1–5] с помощью двумерных и квазитрехмерных математических моделей. Но все они не дают представления об уровне температур конструктивных элементов ТЗ, ведь именно нагрев является ограничивающим фактором уровней как активной, так и реактивной

нагрузки, особенно в режимах эксплуатации ТГ с потреблением реактивной мощности. В таких условиях особую актуальность приобретает создание математических моделей совместного расчета электромагнитного поля и теплообменных процессов в ТЗ ТГ в разных режимах нагрузки, которые могут быть эффективным инструментом оценки новых конструктивных и технологических решений.

Авторами предложена квазитрехмерная математическая модель совместного расчета электромагнитного поля и теплообменных процессов в ТЗ мощного ТГ. Квазитрехмерная модель занимает промежуточное положение между дву- и трехмерными решениями и построена на численных расчетах в поперечном и продольном сечениях ТГ, взаимосвязанных с помощью комплекса граничных условий [3, 4]. Математически строго учитывается режим работы ТГ путем использования системы реально распределенных токов лобовых частей обмоток статора и ротора. Магнитное поле описано не только на поверхности деталей и узлов, но и во всей ТЗ, включая крайние и основные пакеты сердечника статора. Учтены фактическая геометрия ротора и статора, анизотропия физических свойств стали и реальное насыщение сердечника статора.

Основная часть

В качестве объекта исследования рассмотрен серийный турбогенератор типа ТГВ-500, параметры которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры турбогенератора типа ТГВ-500

Main parameters of a turbogenerator of TGV-500 type

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Номинальный режим нагрузки: – активная мощность P_n , МВт – ток статора $I_{сн}$, кА – напряжение обмотки статора $U_{сн}$, кВ – ток возбуждения $i_{вн}$, А – коэффициент мощности $\cos\varphi$	500	Количество параллельных ветвей обмотки: – статора a_s – ротора a_r	2
	17		1
	20	Число последовательных витков обмотки: – статора w_1 – ротора w_2	8
	5120		48
	0,85		
Частота f , Гц	50	Число активных проводников в пазу: – статора s_{n1} – ротора s_{n2}	2
Количество пар полюсов	1		5/3
Диаметр расточки статора D_1 , м	1,32	Значение сопротивления, в. о.: – активного обмотки статора r_1 – главного индуктивного x_d – рассеивания обмотки статора x_{ca}	0,001364
Диаметр ротора D_2 , м	1,12		1,91
Длина сердечника статора l_s , м	6,2		0,218
Воздушный зазор между статором и ротором, мм	100		

Турбогенератор ТГВ-500 в аксиальном направлении состоит из трех частей – центральной и двух концевых. Сердечник статора, шихтованный из высоколегированной холоднокатаной электротехнической стали тол-

щиной 0,5 мм марки E330, набран из 138 пакетов. Два крайних пакета, толщиной 20 мм каждый, разделены пятимиллиметровыми радиальными вентиляционными каналами. Пакеты, начиная с третьего, имеют толщину 40 мм. Зубцы двух крайних пакетов выполнены укороченными. На первой ступени укорочение зубцов составляет 24 мм, на второй пакет выполнен в виде двух ступенек укорочения: первая – на 16 мм, вторая – на 8 мм. В 48 пазах статора размещена трехфазная двуслойная стержневая обмотка. Нажимные фланцы изготовлены из поковок немагнитной стали в виде плоских колец. Под нажимными фланцами установлены медные экраны и немагнитные пальцы, а в самом фланце для охлаждения предусмотрены два кольцевых канала, по которым циркулирует вода.

Модель отвечает реальным размерам ТГ в целом, а также его отдельных узлов. Для каждого узла заданы физические параметры материала, из которого он изготовлен. Для ферромагнетиков построены соответствующие кривые намагничивания.

Ниже приведены результаты расчетов для ТЗ генератора со стороны турбины для режима номинальной нагрузки при номинальной скорости обращения ротора (3000 об/мин). Сторона турбины выбрана потому, что здесь магнитное поле не искажается влиянием токов соединительных шин и выводов (как это имеет место на стороне контактных колец) [6].

На первом этапе расчета рассматривается двумерная полевая модель электромагнитного поля поперечного сечения центральной зоны ТГ. Уравнение для двумерного магнитного поля относительно аксиальной составляющей векторного магнитного потенциала (ВМП) A_z в расчетной области имеет вид

$$j\omega\sigma A + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times A) = J_{\text{стор}}^e e_z, \quad A = A_z e_z, \quad (1)$$

где ω – угловая частота; σ – удельная электропроводность; ∇ – оператор Гамильтона; μ_0 – проницаемость вакуума; μ_r – относительная магнитная проницаемость; $J_{\text{стор}}^e$ – плотность сторонних токов, заданная в сечениях обмоток статора и возбуждения; e_z – орт.

Уравнение (1) дополняется однородным граничным условием первого рода $A_z = 0$, отображающим затухание поля за границами расчетной области.

В обмотке статора принята симметричная система фазных токов:

$$\begin{cases} i_A = I_m \sin(\omega t + \beta); \\ i_B = I_m \sin(\omega t + \beta - 120^\circ); \\ i_C = I_m \sin(\omega t + \beta + 120^\circ), \end{cases} \quad (2)$$

где I_m – амплитуда фазных токов; β – угловое смещение оси, вдоль которой действует магнитодвижущая сила (МДС) трехфазной обмотки статора, по отношению к продольной оси ротора d .

Угол β определяется как [1]

$$\beta = 90^\circ + \theta + \varphi, \tag{3}$$

где θ – угол нагрузки машины; φ – то же фазного смещения между напряжением и током статора.

В соответствии с [6] угол нагрузки θ можно определить из выражения

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{I_s \cos \varphi}{(U_s/x_d) \pm I_s \sin \varphi}, \tag{4}$$

где «+» – соответствует режиму перевозбуждения турбогенератора, «-» – режиму недозабуждения.

В результате расчетов получены следующие результаты.

Мгновенное распределение магнитной индукции и ВМП в определенный момент времени в центральной зоне (в данном случае $t = 0,02$ с, что соответствует одному полному обороту ротора) представлено на рис. 1. Оттенками цвета показаны уровни магнитной индукции в соответствии с приведенной шкалой. Распределение магнитной проницаемости статора и ротора ТГ представлено на рис. 2 (максимальное значение составляет 8542 в ярме статора).

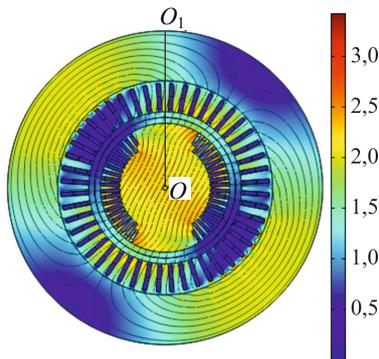


Рис. 1. Распределение электромагнитного поля в центральной зоне статора и ротора в режиме номинальной нагрузки

Fig. 1. Electromagnetic field distribution in the central zone of a stator and a rotor in the mode of rated load

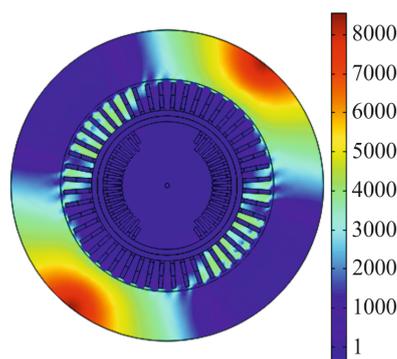


Рис. 2. Распределение магнитной проницаемости в центральной зоне статора и ротора в режиме номинальной нагрузки

Fig. 2. Magnetic permeability distribution in the central zone of a stator and a rotor in the mode of rated load

Максимальное значение магнитной индукции в сердечнике статора при номинальной нагрузке наблюдается в коронках зубцов и составляет 3,4 Тл (рис. 3), распределение электромагнитного поля симметрично вдоль линии результирующей МДС (рис. 1). Распределение магнитной индукции в нажимных пальцах приведено на рис. 4.

Однако под действием электромагнитного поля статора направление линии результирующей несколько отклоняется. Величины магнитной индукции в нажимных пальцах меньше, и максимальное значение составляет 0,53 Тл.

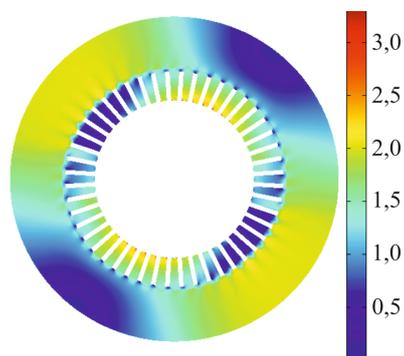


Рис. 3. Распределение магнитной индукции в сердечнике статора в режиме номинальной нагрузки

Fig. 3. Magnetic flux density distribution in the stator core in the mode of rated load

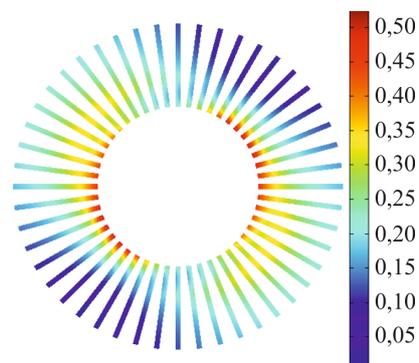


Рис. 4. Распределение магнитной индукции в нажимных пальцах в режиме номинальной нагрузки

Fig. 4. Magnetic flux density distribution in the press pins in the mode of rated load

Нажимная плита и медный экран выполнены из немагнитного материала; плита установлена перед экраном, поэтому распределение электромагнитного поля в них совпадает: максимальные значения магнитной индукции составляют 0,36 и 0,33 Тл соответственно (рис. 5, 6). Поскольку медный экран находится за плитой, аксиальная составляющая магнитного потока в нем меньше.

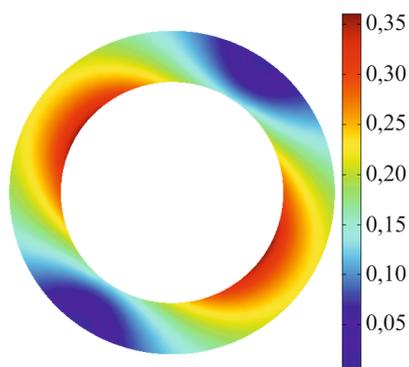


Рис. 5. Распределение магнитной индукции в нажимной плите в режиме номинальной нагрузки

Fig. 5. Magnetic flux density distribution in the press plate in the mode of rated load

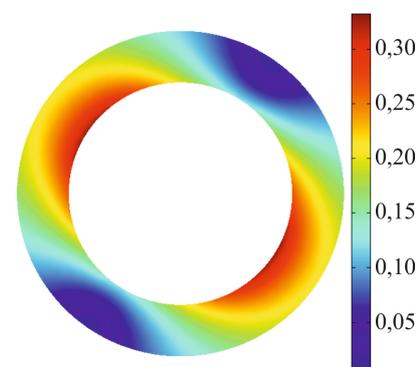


Рис. 6. Распределение магнитной индукции в медном экране в режиме номинальной нагрузки

Fig. 6. Magnetic flux density distribution in the copper shield in the mode of rated load

Имея распределение поля в центральной части, переходим ко второму этапу расчета – моделированию магнитного поля в продольном сечении ТГ. С учетом симметрии вдоль осевого и радиального направлений расчетная область ТЗ представлена в виде половины сечения ротора вдоль его оси и сечения зубца сердечника статора в тангенциальном направлении (по окружности) [5]. Это сечение совпадает с цилиндрической координат-

ной плоскостью rz и является плоскостью симметрии ротора (на рис. 1 она проходит по радиусу OO_1).

Уравнение двумерного поля в цилиндрических координатах для составляющей ВМП A_z , являющейся тангенциальной составляющей в расчетной области, имеет вид (1). Необходимая структура силовых линий магнитного поля формируется с помощью комплекса граничных условий для ВМП, справедливых для внешних границ области [1].

Направления мгновенных фазных токов i_A , i_B и i_C лобовой части обмотки статора для режима нагрузки и часть схемы этой обмотки, вдоль которой проходит сечение OO_1 (для большей наглядности фазы показаны разными линиями), представлены на рис. 7.

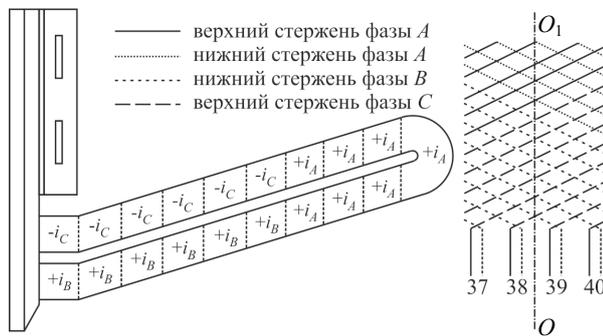


Рис. 7. Мгновенные фазные токи лобовой части обмотки статора и часть обмотки вдоль сечения

Fig. 7. Instantaneous phase currents of stator winding frontal portion and a portion of winding along a section

Поскольку продольное сечение ТГ проходит по продольной оси ротора d (рис. 1), значение плотности тока лобовой части обмотки ротора соответствует заданному току возбуждения (табл. 1). В результате получаем

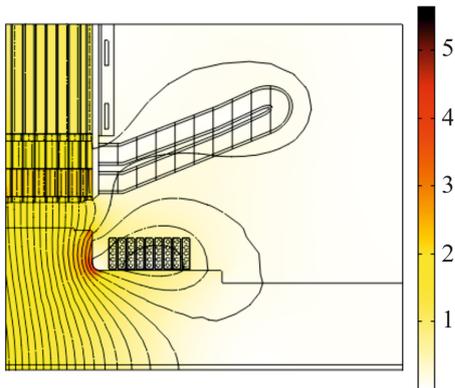


Рис. 8. Распределение электромагнитного поля в торцевой зоне турбогенератора при номинальной нагрузке

Fig. 8. Distribution of electromagnetic field in the end zone of a turbogenerator in the mode of rated load

распределение магнитного поля в ТЗ ТГ типа ТГВ-500 при номинальной нагрузке (рис. 8).

Имея распределение электромагнитного поля в областях протекания вихревого тока, можно получить значение ВМП A^e для каждого элемента расчетной области. Плотность вихревого тока

$$J^e = -j\omega\sigma_e A^e + J_{зстоп}^e \quad (5)$$

Согласно [6, 7] рассчитаем средние потери на вихревые токи в соответствующих областях.

Получив распределение потерь по элементам ТЗ, переходим к третьему этапу исследования – моделированию теплообменных процессов в концевой зоне ТГ.

Уравнение процесса теплообмена в двумерной постановке имеет вид

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k\nabla T) = Q, \quad (6)$$

где ρ , C_p , k – теплофизические характеристики материалов: плотность, теплоемкость и теплопроводность; T – температура; Q – удельные объемные тепловые потери.

Турбогенератор ТГВ-500 имеет радиальную систему вентиляции, при которой холодный водород (с расчетной температурой 40 °С) подается в радиальные каналы между пакетами и нажимными пальцами со стороны зазора с дальнейшим движением в сторону спинки. Коэффициенты теплоотдачи теплообменных поверхностей заданы в соответствии с [6, 8].

В результате получаем распределение температур в ТЗ ТГ при номинальной нагрузке (рис. 9). Распределение нагревов двух крайних пакетов, нажимного пальца, медного экрана и нажимной плиты показано на рис. 10.

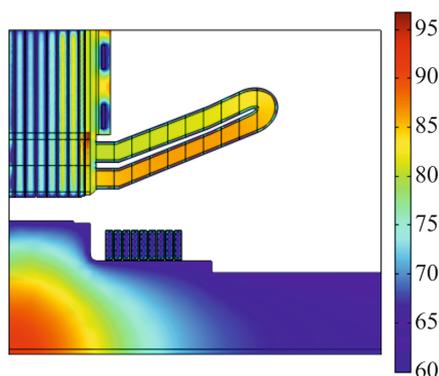


Рис. 9. Распределение температуры в торцевой зоне турбогенератора при номинальной нагрузке

Fig. 9. Temperature distribution in the end zone of a turbogenerator in the mode of rated load

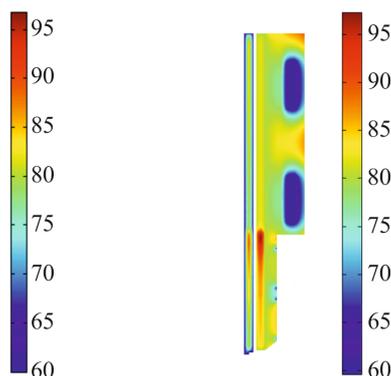


Рис. 10. Распределение температуры в области «два крайних пакета – нажимной палец – экран – нажимная плита»

Fig. 10. Temperature distribution in the area of “two end packages – press fin – shield – press plate”

Максимальная температура (97,3 °С) наблюдается в зубцовой зоне крайнего пакета в области возле дна паза. Это объясняется тем, что, кроме радиального поля, зубцовая зона нагружена аксиальным потоком, созданным МДС лобовых частей обмотки статора, рассеиванием лобовых частей обмотки ротора, а также «выпучиванием» части основного потока из воздушного зазора. К тому же причиной локальной концентрации аксиальной составляющей поля в области возле дна паза является эффект экранирования поля нажимной плитой (рис. 8).

Понятно, что распределение нагревов нажимной плиты обусловлено наличием каналов с охлаждающей водой. Однако они эффективны лишь

в локальной близости, и на нагрев медного экрана не влияют. Поверхность пальцев, обращенная к плите, имеет температуру на (10–15) °С выше, чем поверхность, обращенная к сердечнику. С отдалением от зубцовой зоны крайних пакетов с максимальной температурой в сторону спинки сердечника температура резко уменьшается ввиду экранирующего действия нажимной плиты и медного экрана. Температура также уменьшается при приближении к зазору. Аксиальная составляющая магнитной индукции в зоне коронки зубца достигает 0,70–0,75 Тл (торец ступеньки первого пакета), однако эта зона интенсивно охлаждается газом, циркулирующим в зазоре.

С учетом изложенного можно сделать вывод, что нагрев элементов ТЗ ТГ крайне неравномерен. Это определяется распределением потерь и схемой охлаждения. Максимальные значения температуры в отдельных элементах выше средних почти втрое. С целью оценки адекватности разработанного алгоритма исследования температурного поля, реализованного в среде Comsol Multiphysics [9], было выполнено сопоставление расчетных значений нагревов ТЗ ТГ типа ТГВ-500 в режиме короткого замыкания при $I_s = 0,6I_{сн}$ с данными экспериментальных исследований [7, 8, 10]. Полученные расхождения расчетных и экспериментальных значений не превысили 7 %, что свидетельствует о применимости использованных подходов и допущений и о возможности применения разработанной модели для инженерных целей.

ВЫВОДЫ

1. Разработана уточненная квазитрехмерная математическая модель совместного расчета электромагнитного поля и теплообменных процессов в торцевой зоне мощного турбогенератора с радиальной системой вентиляции. Созданная модель в сравнении с известными отличается строгим учетом физико-технических факторов и простотой программной реализации.

2. Результаты моделирования отвечают общим представлениям о протекании электромагнитных и тепловых процессов в торцевой зоне мощного турбогенератора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кенсичкий, О. Г. Електромагнітне поле у торцевій зоні турбогенератора при зміні реактивного навантаження / О. Г. Кенсичкий, Д. І. Хвалін // Технічна електродинаміка. 2018. № 1. С. 62–68.
2. Кенсичкий, О. Г. Квазітривимірна модель електромагнітного поля у торцевій зоні турбогенератора / О. Г. Кенсичкий, Д. І. Хвалін // Праці Ін-ту електродинаміки Національної академії наук України. 2017. № 48. С. 59–64.
3. Милых, В. И. Принципы расчета магнитного поля в торцевой зоне турбогенератора в различных режимах его работы / В. И. Милых, А. И. Высочин // Электротехника і електромеханіка. 2010. № 3. С. 17–22.
4. Милых, В. И. Численные расчеты магнитных полей в торцевой зоне турбогенераторов / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ».

- Сер. Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. 2015. Т. 1114, № 5. С. 3–11.
5. Eddy Current Analysis in the Stator End Structures of Large Capacity Turbine Generators / M. Fujita [et al.] // International Conference on Electrical Machines and Systems, November, 2009. Tokyo, Japan. P. 1–6.
 6. Постников, И. М. Электромагнитные и тепловые процессы в концевых частях мощных турбогенераторов / И. М. Постников, Л. Я. Станиславский, Г. Г. Счастливый. Киев: Наук. думка, 1971. 360 с.
 7. Турбогенераторы. Расчет и конструкция / В. В. Титов [и др.]. Л.: Энергия, 1967. 896 с.
 8. Счастливый, Г. Г. Турбо- и гидрогенераторы при переменных графиках нагрузки / Г. Г. Счастливый, Г. М. Федоренко, В. И. Выговский. Киев: Наук. думка, 1985. 208 с.
 9. Comsol Multiphysics Modeling and Simulation Software [Electronic Resource]. Mode of Access: <http://www.comsol.com/>.
 10. Счастливый, Г. Г. Прибор для измерения теплоотдачи в электрических машинах и аппаратах / Г. Г. Счастливый, Г. М. Федоренко, В. И. Выговский // Электротехническая промышленность. Сер. Электрические машины. 1978. № 7. С. 10–13.

Поступила 02.05.2018 Подписана в печать 10.07.2018 Опубликовано онлайн 30.01.2019

REFERENCES

1. Kentsits'kii O. H., Hvalin D. I. (2018) The Turbogenerator End Zone Electromagnetic Field under Alterations of the Reactive Load. *Tekhnichna Elektrodynamika = Technical Electrodynamics*, (1), 62–68 (in Ukrainian).
2. Kentsits'kii O. H., Hvalin D. I. (2017) A Quasi-Three-Dimensional Model of Electromagnetic Field in the Turbogenerator End Zone. *Pratsi Institutu Elektrodinamiki Natsionalnoi Akademii Nauk Ukraini* [Works of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine], (48), 59–64 (in Ukrainian).
3. Milykh V. I., Vysochyn A. I. (2010) Principles of Calculation the Magnetic Field in the End Zone of a Turbogenerator under Different Operating Conditions. *Elektrotehnika i Elektromekhanika = Electrical Engineering and Electromechanics*, (3), 17–22 (in Russian).
4. Milykh V. I., Polyakova N. V. (2015) Numerical Calculations of the Magnetic Fields in a Turbogenerators End Zone. *Vistnyk Natsionalnoho Tekhnichnogo Universytetu "HPI". Zbirnyk Naukovykh Prats'. Ser. Elektrichni Mashyny ta Elektromekhanichne Peretvorennia Energiyi = Bulletins of NTU "KhPI". Ser. Electrical Machines and Electromechanical Energy Conversion*. Kharkov, NTU "KhPI", 1114 (5), 3–11 (in Russian).
5. Fujita M., Ueda T., Tokumasu T., Nagakura K., Kakiuchi M., Otaka T. (2009) Eddy Current Analysis in the Stator End Structures of Large Capacity Turbine Generators. *International Conference on Electrical Machines and Systems*. Tokyo, Japan, 1–6. <https://doi.org/10.1109/icems.2009.5382938>.
6. Postnikov I. M., Stanislavskii L. Ya., Schastlivyi G. G. (1971) *Electromagnetic and Thermal Processes in the End Zones of Powerful Turbogenerators*. Kiev, Naukova Dumka Publ. 360 (in Russian).
7. Titov V. V., Hutoreckii G. M., Zagorodnaya G. A., Varatian G. P. et al. (1967) *Turbogenerators. Calculation and Construction*. Leningrad, Energia Publ. 896 (in Russian).
8. Schastlivyi G. G., Fedorenko G. M., Vygovskiy V. I. (1985) *Turbo- and Hydrogenerators at the Variable Loading Graphics*. Kiev, Naukova Dumka Publ. 208 (in Russian).
9. *Comsol Multiphysics Modeling and Simulation Software*. Available at: <http://www.comsol.com/>.
10. Schastlivyi G. G., Fedorenko G. M., Vygotskii V. I. (1978) Apparatus for Heat Transfer Measurement in the Electrical Machines and Devices. *Elektrotekhnicheskaya Promyshlennost'. Ser. Elektricheskie Mashiny* [Electrical Engineering Industry. Ser. Electrical Machines], (7), 10–13 (in Russian).

Received: 2 May 2018

Accepted: 10 July 2018

Published online: 30 January 2019

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-47-60>

УДК 622.276.654

Одномерное моделирование фронта внутрипластового горения нефти с учетом подвижной и неподвижной горючих компонент

И. А. Козначеев¹⁾, К. В. Доброго²⁾

¹⁾Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь),

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Численно решена одномерная осесимметричная задача об иницировании волны горения в нефтенасыщенном пласте. Рассматривались две горючие компоненты – подвижная (нефть) и неподвижная (кероген, нефтяной абсорбат). Проанализировано влияние наличия двух горючих компонент на время иницирования горения и динамику фронта. Показано, что при сохранении полного теплосодержания системы увеличение доли подвижной компоненты приводит к замедлению образования очага и снижению максимальной температуры в пласте, несмотря на более высокую реакционную способность жидкой компоненты. Расчеты показывают наличие двух «всплесков» скорости фронта: первый соответствует времени иницирования горения, второй – моменту, когда фронт выгорания твердой компоненты обгоняет фронт вытеснения жидкой горючей компоненты. Отмечено, что скорости распространения фронта, по крайней мере после прохождений «всплесков» и выхода на квазистационарный режим, близки для случаев с различной массовой долей жидкой компоненты. Характерное время формирования очага экзотермической реакции может увеличиться с 50 до 200 сут при повышении массовой доли жидкой компоненты с 30 до 80 % при принятых термодинамических условиях в пласте. Таким образом, при реализации термогазового метода в высокопроизводительных пластах повышается вероятность трудности иницирования очага. Поэтому изучение закономерностей внутрипластового горения для таких случаев представляет особый интерес. Например, задача иницирования очага может быть решена за счет повышения концентрации кислорода в дутье или использования нестационарной (периодической) подачи дутья. Установлено, что учет более реакционноспособной подвижной компоненты приводит к уширению фронта. Это может положительно сказаться на его термогидродинамической устойчивости. Результаты исследований могут быть использованы при разработке проектов нефтедобычи, конструировании специализированных печей для сжигания многокомпонентных топливных смесей в неподвижном слое, при термохимических исследованиях многокомпонентных топлив.

Ключевые слова: горение, фильтрация, внутрипластовое горение, нефтедобыча, численное моделирование

Для цитирования: Козначеев, И. А. Одномерное моделирование фронта внутрипластового горения нефти с учетом подвижной и неподвижной горючих компонент / И. А. Козначеев, К. В. Доброго // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 1. С. 47–60. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-47-60>

Адрес для переписки

Доброго Кирилл Викторович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-42-32
ef@bntu.by

Address for correspondence

Dobrego Kirill V.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-42-32
ef@bntu.by

One-Dimensional Simulation of the In-Situ Oil Combustion with Consideration to Fluid and Solid Combustible Components

I. A. Koznacheev¹⁾, K. V. Dobrego²⁾

¹⁾A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

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

Abstract. The one-dimensional axisymmetric problem of initiation of a combustion wave in an oil-saturated reservoir is solved numerically. Two combustible components, viz. liquid (oil) and solid (kerogen, oil sorbate) were considered. The influence of the abovementioned components on time of the hot site ignition and combustion front speed was simulated and analyzed. It was demonstrated that growth of the mass fraction of liquid component (the total heat content being preserved) results in retard of formation of the hot site near the well and in reduction of the maximum temperature of the combustion wave, disregarding of the higher reactivity of liquid combustible. Simulation revealed existence of the two “peaks” of thermal front velocity. The first one corresponds by time to ignition of combustion site. The second one corresponds to a moment when the solid component combustion front overrides the oil displacement front. Calculations shown, that thermal wave propagation velocity, at least after passing the “peaks” and transition to quasi-steady regime, does not considerably depend on mass fraction of the fluid component in the system. A typical term of the exothermic reaction site formation may increase from 50 to 200 days in case of growth of the liquid component content from 30 to 80 mass % at the considered thermal conditions in the oil reservoir. Thus, the implementation of the thermo-gas method in high-productive layers increases the likelihood of difficulty of initiation of a fire. Therefore, the study of the regularities of intra-combustion in such cases is of a particular interest. For instance, the task of combustion site ignition may be resolved by increase of oxygen content in blowing-gas or by means of non-steady (periodical) blowing. It is found that taking into consideration of highly reactive liquid component results in widening (diffusion) of the thermal front, which may play positive role in its spatial thermo-hydrodynamic stabilization. The results of simulation may be utilized for development of technical projects of oil recovery via in-situ combustion, for designing of furnaces utilizing multicomponent fixed layer fuels and for thermochemical investigation of multicomponent fuels.

Keywords: combustion, filtration, in-situ combustion, oil production, numerical simulation

For citation: Koznacheev I. A., Dobrego K. V. (2019) One-Dimensional Simulation of the In-Situ Oil Combustion with Consideration to Fluid and Solid Combustible Components. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (1), 47–60. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-47-60> (in Russian)

Введение

Методы внутрислоевого горения были впервые применены в Советском Союзе для повышения нефтеотдачи пластов на Нефтяно-Ширванском месторождении под руководством А. Б. Шейнмана и К. К. Дуброва в 1934 г. [1]. Суть метода состоит в нагнетании кислородосодержащих газов в пласт, иницировании и поддержании экзотермических окислительных процессов внутри пласта, прогреве пласта и вытеснении нефти нагнетаемым газом и продуктами реакций. В настоящее время разделяют понятия «термогазовый метод повышения нефтеотдачи пласта» [2] (термин введен ВНИИнефть в 1971 г.) и «метод внутрислоевого горения». Под первым, как правило, понимается более комплексный, с точки зрения воздействия на пласт, относительно низкотемпературный процесс, а под послед-

ним – распространение высокотемпературной ($T = (450–500)$ °C) волны в нефтесодержащем пласте. Однако по сути теплофизических задач, возникающих при реализации указанных методов, они идентичны.

Несмотря на длительную историю применения термогазового метода (ТГМ) и значительный опыт, отраженный в [3–5] и других источниках, его эффективное использование является своего рода искусством в силу уникальности структурных, геометрических, гидродинамических и химических характеристик каждого месторождения и поля скважин. Фактически для применения ТГМ необходимо решать задачи инициирования очага экзотермических реакций и поддержания оптимальной температуры, стабильности и целостности температурных и химических фронтов в пласте.

Из практики известно, что при достаточно высокой внутрипластовой температуре (свыше 60 °C) и коксуемости нефти очаг тепловыделения стабильно образуется вблизи забойной зоны скважины. При более низких внутрипластовых температурах встает вопрос о времени саморазогрева пласта, принципиальной возможности инициирования очага, а также о последующей динамике температурного фронта. Указанные вопросы должны решаться путем детального численного моделирования с экспериментальной проверкой основных элементов модели. Однако предвзято детальные численные исследования должно решение модельных задач.

В [6] предложена численная схема расчета внутрипластового горения и исследовано медленное распространение экзотермической гетерогенной реакции в пористой среде при фиксированном потоке водовоздушной смеси через продукты сгорания. В [7] рассмотрена численная модель процесса внутрипластового горения в линейной пористой среде. Расчеты, проведенные в [7], показали, что на основные показатели горения в прискважинной зоне (скорость распространения горения, температура зоны реакции, продолжительность периода зажигания) влияют как естественные условия, так и технологические параметры.

В [8–11] проанализированы близкие по характеру задачи, однако это не позволяет сделать вывод о возможности управления и оптимизации инициирования очага горения внутри пласта.

В [12] задача об инициировании температурного очага в нефтесодержащем пласте в условиях вынужденной фильтрации кислородосодержащего газа рассмотрена комбинированным аналитическим и численным методами. При анализе задачи пренебрегали диффузией, выгоранием конденсированной компоненты, считали, что профиль концентрации устанавливается быстрее температурного профиля, также принимали другие допущения. Определено влияние выгорания окислителя и конвективного уноса теплоты на время самовозгорания очага. Динамика возгорания очага и его эволюция моделировались численно. В модели не учитывалось вытеснение (увлечение) жидкой топливной компоненты. Получены выражения для времени самовоспламенения очага от начальной температуры, массовой доли кислорода в дутье, тепловых потерь в пласте.

Поскольку в условиях реального пласта вытесняемая нефть является горючей компонентой наряду с керогеном и неподвижной пленкой сорбата, представляется интересным выяснить влияние наличия двух топливных компонент – вытесняемой и неподвижной – на параметры воспламенения и динамику очага.

В статье сформулирована и численно решена одномерная осесимметричная задача об иницировании и динамике фронта горения в нефтесодержащем пласте с учетом подвижной и неподвижной горючих компонент. Проанализировано влияние подвижной компоненты на время иницирования очага и динамику фронта.

Физическая постановка задачи

Рассматриваются осесимметричная система, представляющая собой горизонтальный нефтеносный пласт постоянной толщины, ограниченный сверху и снизу материнской породой, и цилиндрическая скважина, в которую подается воздушное или обогащенное кислородом дутье (рис. 1). Дутье фильтруется равномерно в горизонтальной плоскости. Нефть, находящаяся в пласте, окисляется, что приводит к тепловыделению. Если эта теплота не успевает рассеиваться в окружающие пласты, наблюдается саморазогрев. Предел роста температуры определяется теплотерями и параметрами системы. После достижения этого предела в пласте возникает распространяющаяся волна экзотермического окисления, движущаяся в направлении свежего горючего. В системе рассматриваются две независимые горючие компоненты: жидкая (нефть) и твердая (кероген, нефтяной сорбат и/или ооксованная нефть). Жидкая компонента увлекается движением газовой смеси, а твердая покоится вместе с вмещающей породой.

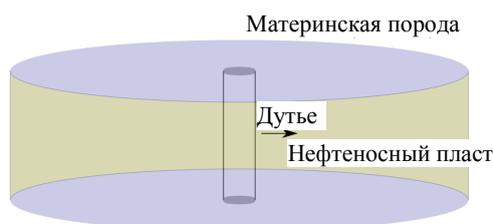


Рис. 1. Схема системы

Fig. 1. Diagram of the system

Математическая постановка задачи

Математическая модель тепло- и массообмена в пласте представляет собой систему уравнений неразрывности газовой компоненты, сохранения окислителя (кислорода), сохранения подвижной горючей компоненты, сохранения неподвижной горючей компоненты и уравнение баланса энергии:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla (\rho_g u_g) = s_{g,1} R_1 + s_{g,2} R_2; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_g a)}{\partial t} + \nabla(\rho_g u_g a) = \nabla(D \nabla(\rho_g a)) - s_{a,1} R_1 - s_{a,2} R_2; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \nabla(\rho_l u_l) = \nabla(D_{\text{dis}} \nabla \rho_l) - s_l R_2; \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho_b b)}{\partial t} = -s_b R_1; \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} + \nabla(\rho_l c_l u_l T) + \nabla(\rho_g c_g u_g T) = \nabla(\lambda \nabla T) + Q_1 R_1 + Q_2 R_2 - \beta(T - T_0). \quad (5)$$

Если учитывать изменение плотности газовой смеси за счет образования газа при фазовых переходах и химических реакциях, то плотность газовой смеси в этой системе неизвестна и общее число неизвестных (ρ_g , u_g , a , ρ_l , b , T) превышает число уравнений. В качестве дополнительного можно использовать нестационарное уравнение фильтрации Дарси

$$\rho_g \frac{\partial u_g}{\partial t} + \rho_g (u_g \nabla) u_g = -\nabla p - \frac{\mu_g}{k_0} u_g. \quad (6)$$

При использовании (6) в системе уравнений появляется дополнительный параметр состояния – давление. Уравнение состояния позволит связать этот параметр с другими неизвестными (ρ_g , a , T). При температурах и давлениях, которые обычно имеют место в нефтеносных пластах, газы, составляющие воздух, за исключением водяного пара, находятся в сверхкритическом состоянии, поэтому необходимо использовать уравнения состояния реального газа. На данном этапе ограничимся уравнением Ван-дер-Ваальса

$$\left(p + \frac{a_V \rho^2}{M^2} \right) \cdot \left(\frac{M}{\rho} - b_V \right) = RT. \quad (7)$$

Скорость фильтрации жидкой горючей компоненты находится из уравнения

$$\mu_g u_g = \mu_l u_l, \quad (8)$$

поэтому ее можно не рассматривать как отдельную неизвестную величину.

Выражения для скоростей реакции запишем в аррениусовской форме:

$$R_1 = W_1 a b \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right); \quad (9)$$

$$R_2 = W_2 a \rho_l \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right). \quad (10)$$

Значения кинетических параметров были взяты из [14].

На цилиндрической поверхности скважины (вход в пласт) задавались граничные условия: массовый расход дутья и содержание кислорода; нулевой градиент концентрации кислорода; условие третьего рода для температуры:

$$G_m|_{r=r_0} = G_{m,0};$$

$$a|_{r=r_0} = a_0 P;$$

$$\frac{\partial a}{\partial r}|_{r=r_0} = 0;$$

$$h(T_0 - T)|_{r=r_0} = \lambda \nabla T|_{r=r_0}.$$

На внешней поверхности расчетного домена (выход из пласта) задавали граничные условия: давление; содержание жидкой компоненты; нулевой градиент содержания жидкой компоненты; нулевой градиент температуры. В качестве начальных условий задавались постоянные поля температуры, содержания жидкой и твердой горючих компонент в пласте; скорость фильтрации, соответствующая стационарному решению уравнения неразрывности; поле концентрации окислителя, соответствующее стационарному решению уравнения (2) в изотермической постановке; поле давления, соответствующее стационарному решению (6).

Стандартные значения параметров системы, используемые для расчета, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Стандартные значения параметров расчета
The standard values of the calculation parameters

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
G	0,005 м ² /с	μ_g	$2,2 \cdot 10^{-5}$ Па·с	Q_1	40 МДж/кг
ρ_g	1 кг/м ³	μ_l	$2 \cdot 10^{-3}$ Па·с	Q_2	20 МДж/кг
$s_{a,1}$	3,3	ρ_b	1000 кг/м ³	β	0,8 Вт/(м ³ ·К)
$s_{a,2}$	3,3	b_0	0,02	T_0	350 К
a_0	0,21	s_b	1	W_1	10 ⁷ кг/(м ³ ·с)
ρ_{l0}	400 кг/м ³	ρc	$2 \cdot 10^6$ Дж/(м ³ ·К)	W_2	180 с ⁻¹
D	$9 \cdot 10^{-4}$ м ² /с	$\rho_l c_l$	$1 \cdot 10^6$ Дж/(м ³ ·К)	E_1	73,5 кДж/моль
D_{dis}	0,1 d _{0g}	$\rho_g c_g$	1200 Дж/(м ³ ·К)	E_2	50,4 кДж/моль
s_l	1	λ	4 Вт/(м·К)	d_0	0,003 м

Результаты расчетов

Динамика профилей концентрации окислителя, твердой и жидкой топливных компонент, дающих представление как о характере инициирования очага, так и о его динамике, показана на рис. 2–4.

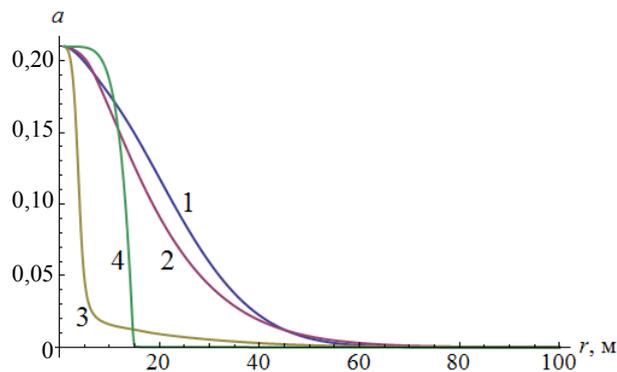


Рис. 2. Зависимость концентрации окислителя от координаты для времени:
1 – $t = 2,4$ ч; 2 – 4 сут; 3 – 29 сут; 4 – 98 сут

Fig. 2. The dependence of the oxidant concentration on the time coordinates:
1 – $t = 2.4$ hours; 2 – 4 days; 3 – 29 days; 4 – 98 days

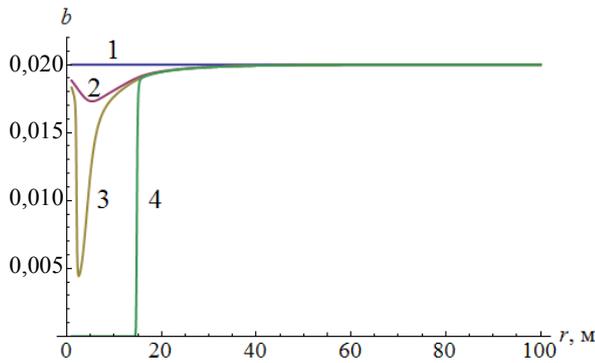


Рис. 3. Зависимость содержания твердой топливной компоненты от координаты
для времени: 1 – $t = 2,4$ ч; 2 – 24 сут; 3 – 32 сут; 4 – 98 сут

Fig. 3. The dependence of the content of solid fuel components on the time coordinates:
1 – $t = 2.4$ hours; 2 – 24 days; 3 – 32 days; 4 – 98 days

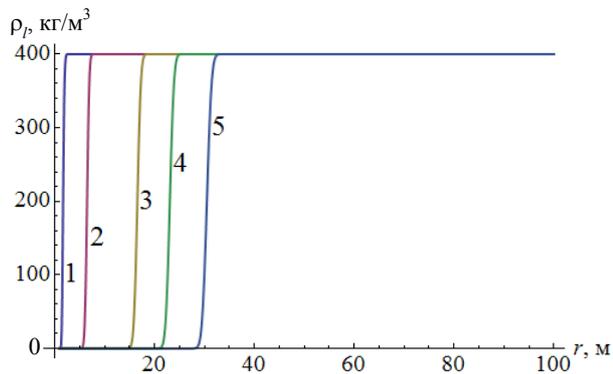


Рис. 4. Зависимость содержания жидкой топливной компоненты от координаты
для времени: 1 – $t = 2,4$ ч; 2 – 4 сут; 3 – 29 сут; 4 – 56 сут; 5 – 98 сут

Fig. 4. The dependence of the content of liquid fuel components on the time coordinates:
1 – $t = 2.4$ hours; 2 – 4 days; 3 – 29 days; 4 – 56 days; 5 – 98 days

Эволюция температурного профиля показана на рис. 5. Здесь представлены профили температур, реализуемые при наличии лишь неподвижной топливной компоненты (пунктирные линии) и в случае наличия подвижной и неподвижной компонент (сплошные линии). Как видно из графиков, на начальной стадии процесса сказывается дополнительное тепловыделение за счет окисления подвижной топливной компоненты. Однако такое сопоставление является не вполне корректным, поскольку в двух рассматриваемых случаях не равны теплосодержания горючих компонент на единицу объема пласта в начальный момент времени. Исследование влияния наличия подвижной компоненты при постоянном общем теплосодержании описано ниже.

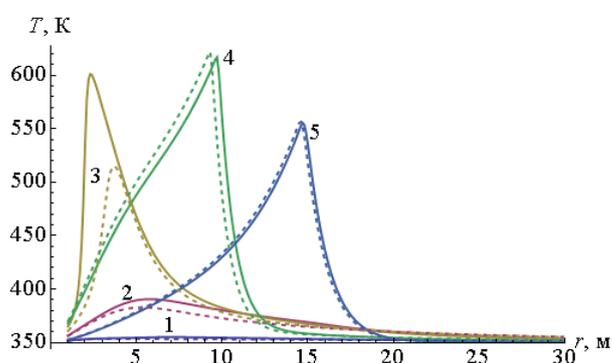


Рис. 5. Зависимость температуры от координаты для времени: 1 – $t = 4$ сут; 2 – 24; 3 – 32; 4 – 56; 5 – 98 сут; сплошная линия – система с подвижной и неподвижной топливными компонентами; штриховая – то же с одной неподвижной компонентой ($\rho_{10} = 0$)

Fig. 5. The temperature dependence on the time coordinates: 1 – $t = 4$ days; 2 – 24; 3 – 32; 4 – 56; 5 – 98 days; solid line – system with mobile and stationary fuel components; dashed line – system with one fixed component ($\rho_{10} = 0$)

Зависимость скорости газа в пласте от радиальной координаты и времени представлена на рис. 6.

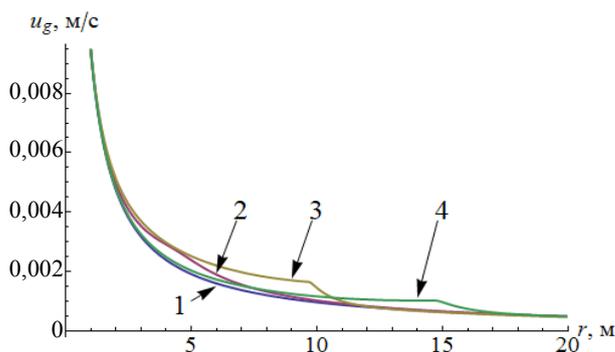


Рис. 6. Зависимость скорости газа от координаты для времени: 1 – $t = 4$ сут; 2 – 29; 3 – 56; 4 – 98 сут

Fig. 6. The dependence of the gas velocity on the time coordinates: 1 – $t = 4$ days; 2 – 29; 3 – 56; 4 – 98 days

Из приведенных графиков видно, что процесс формирования фронта вблизи нагнетательной скважины занимает около 30 сут, после чего начинается его распространение.

Координаты фронта в данный момент времени определялись двумя способами. Согласно первому, положение фронта принималось соответствующим положению точки, в которой градиент концентрации максимален (точка перегиба профиля). Согласно второму, фронт соответствовал точке, в которой достигается максимум температуры среды. Зависимости координаты фронта, рассчитанной по обоим способам, от времени показаны на рис. 7. Убывание координаты фронта на начальном участке связано с процессом его формирования вблизи нагнетательной скважины. Затем, примерно после 30 сут, начинается его распространение с убывающей скоростью. Зависимость скорости фронта, рассчитанной по второму способу, от времени для системы, не включающей и включающей подвижную компоненту, приведена на рис. 8.

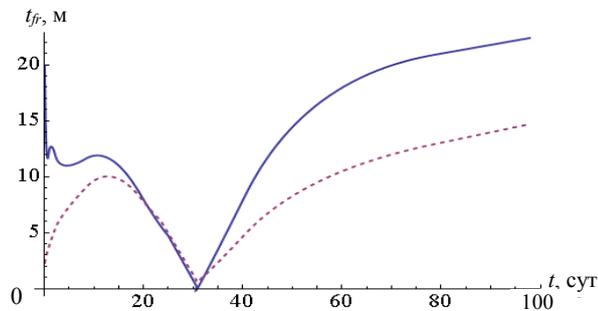


Рис. 7. Зависимость координаты фронта от времени: — положение фронта, рассчитанного по профилю концентрации окислителя; - - - - то же по профилю температуры

Fig. 7. The dependence of the coordinate of the front on the time: — position of the front calculated according to the profile of the oxidant concentration; - - - - same calculated according the temperature profile

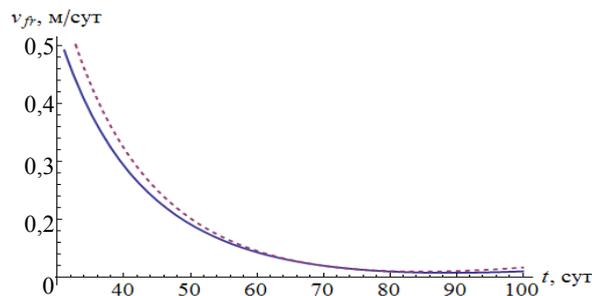


Рис. 8. Зависимость скорости фронта (по температуре) от времени: — система с подвижной и неподвижной топливными компонентами; - - - - то же с одной неподвижной компонентой ($\rho_{i0} = 0$)

Fig. 8. The dependence of the front speed (by the temperature) on time: — system with liquid and solid fuel components; - - - - system with one fixed component ($\rho_{i0} = 0$)

Большие значения скорости фронта для варианта с одной неподвижной топливной компонентой по сравнению со случаем с двумя компонентами при одинаковых значениях t вызваны смещением кривой по времени

за счет запаздывания воспламенения при одной неподвижной компоненте. Если построить графики зависимостей скорости фронта от координаты фронта для двух случаев, то они практически совпадут.

Убывание скорости фронта по мере распространения связано с цилиндрической симметрией задачи, что приводит к тому, что скорость поступления окислителя и плотность тепловыделения на единицу площади фронта уменьшаются обратно пропорционально радиусу фронта. Вследствие тепловых потерь пласта существует предельно возможная плотность тепловыделения, а следовательно, предельный радиус фронта.

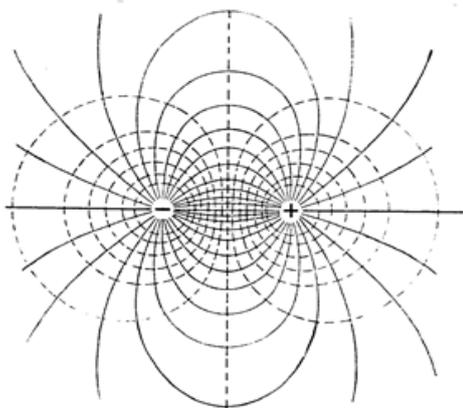


Рис. 9. Поле диполя

Fig. 9. Dipole field

Однако цилиндрическая симметрия задачи со временем нарушается, плотность потока фильтрации окислителя стабилизируется в направлении добывающей скважины и может даже нарастать. Элементарная задача о силовых линиях тока (силовых линиях диполя) (рис. 9) показывает, что максимальное разряжение плотности потока вдоль линии, соединяющей полюса, соответствует радиусу $R^* \approx L/\pi$ осесимметричной задачи, где L – расстояние между полюсами. Таким образом,

можно оценить необходимый расход дутья, способный обеспечить непрерывное во времени распространение фронта.

Для сопоставления результатов расчетов при различных энергокладах от подвижной и неподвижной компонент топлива были введены две дополнительные характеристики, зависящие от параметров расчета:

– полное удельное энергосодержание в начальный момент времени

$$Q_{tot} = Q_1 \rho_b b_0 + Q_2 \rho_{l0};$$

– доля начального энергосодержания, приходящаяся на подвижную компоненту:

$$\phi_l = \frac{Q_2 \rho_{l0}}{Q_{tot}}.$$

Была проведена серия параметрических исследований по влиянию Q_{tot} , ϕ_l , коэффициента теплоотдачи к материнской породе β на время воспламенения t_{ign} и максимальную температуру в пласте T_{max} за все время расчета (конец расчета в вычислительных экспериментах соответствовал 600 сут физического времени). Время воспламенения определялось по максимальной скорости роста максимальной температуры в пласте с течением времени. Результаты варьирования показаны на рис. 10–12.

Полное удельное энергосодержание Q_{tot} варьировалось за счет пропорционального изменения параметров Q_1 и Q_2 без изменения b_0 и ρ_{l0} .

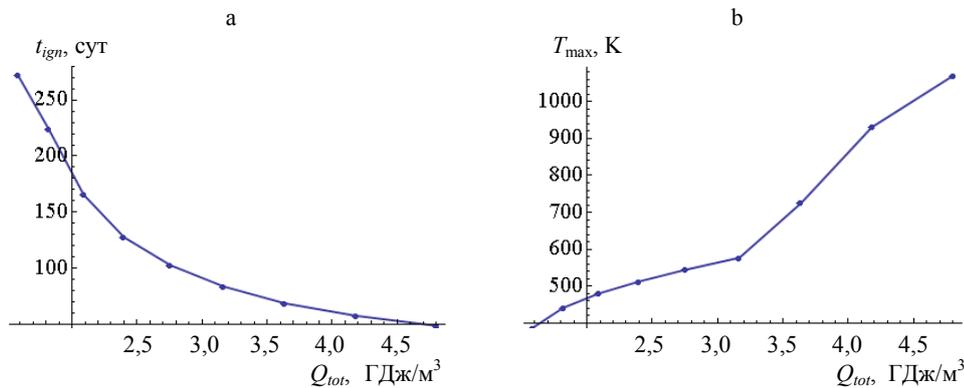


Рис. 10. Зависимость времени воспламенения (а) и максимальной температуры в пласте (б) от полного удельного энергосодержания

Fig. 10. The dependence of time to ignition (a) and the maximum temperature in the reservoir (b) on the full energy content per unit

Доля энергосодержания ϕ_l , приходящаяся на подвижную компоненту, варьировалась изменением параметров b_0 и ρ_{l0} без изменения Q_1 и Q_2 и полного удельного энергосодержания Q_{tot} .

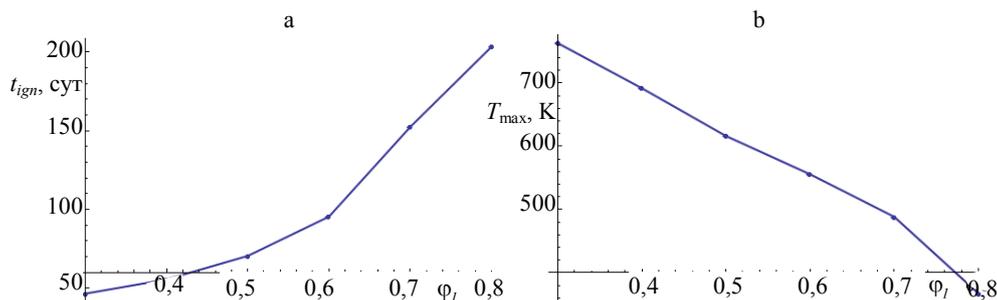


Рис. 11. Зависимость времени воспламенения (а) и максимальной температуры в пласте (б) от доли энергосодержания, приходящейся на подвижную компоненту

Fig. 11. The dependence of time to ignition (a) and the maximum temperature in the reservoir (b) on the share of the energy content attributable to the liquid component

Из результатов расчета следует, что при фиксированном начальном общем теплосодержании системы наличие высокоподвижной горючей фракции снижает вероятность и скорость образования высокотемпературного очага, так же как и максимальную температуру в пласте. Физически это связано, прежде всего, с эвакуацией горючей подвижной компоненты из области горения неподвижной и со снижением плотности энерговыделения. При этом очевидно, что большему количеству подвижной компоненты соответствует более высокая доля извлеченной нефти. Поэтому можно ожидать, что пласты, в которых инициирование очага затруднено, являются более перспективными с точки зрения объема и полноты извлечения сырья.

Была рассчитана динамика температурного фронта для различных начальных массовых долей жидкой компоненты в системе. Соответствующие данные о координатах фронта и его скорости приведены на рис. 12, 13.

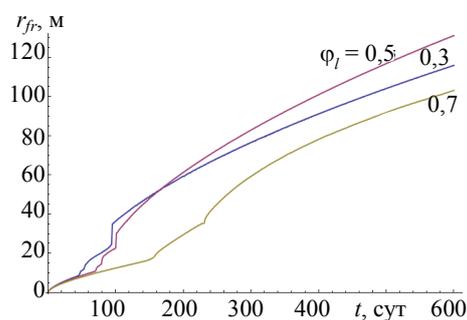


Рис. 12. Зависимость координаты фронта от времени для массовой доли жидкой компоненты φ_l

Fig. 12. The dependence of the coordinate of the front on time for mass fraction of liquid components φ_l

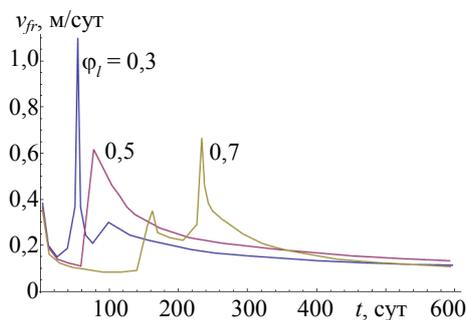


Рис. 13. Зависимость скорости фронта от времени для массовой доли жидкой компоненты φ_l

Fig. 13. The dependence of the front speed of the front on time for mass fraction of liquid components φ_l

Температурный фронт, связанный с горением твердой компоненты, пространственно разнесен с фронтом вытеснения нефти. Расчеты показывают наличие двух «всплесков» скорости фронта: первый соответствует времени инициирования горения, второй – моменту, когда фронт выгорания твердой компоненты обгоняет фронт вытеснения жидкости. При этом доля окислителя, расходуемая на горение нефти, растет, область тепловыделения расширяется, а максимальная температура падает (рис. 14). Для малых φ_l это происходит сразу после инициирования горения и поэтому не выявлено на рис. 13. Для $\varphi_l = 0,7$ оба всплеска отчетливо видны.

Согласно расчетам скорости распространения фронта после прохождения «всплесков» для всех трех рассмотренных случаев близки. Это говорит о том, что тепловыделение в области горения в большей степени определяется количеством доступного окислителя, чем реакционной способностью отдельных компонент. Эффект может объясняться и более сложным сочетанием кинетических и гидродинамических факторов.

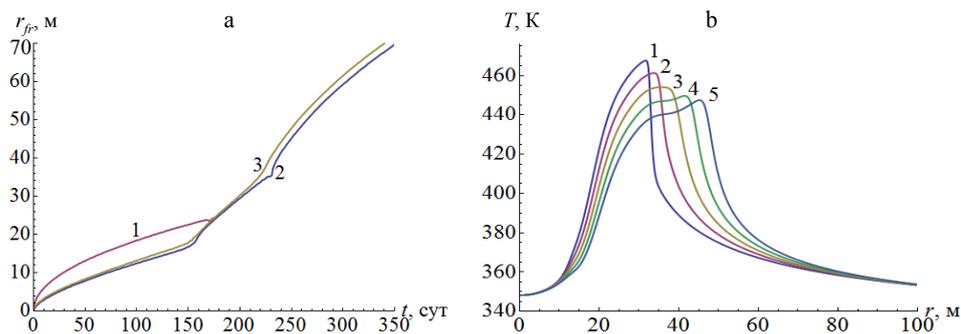


Рис. 14. Зависимость: а – положения фронтов вытеснения (1), максимальной температуры (2), горения твердого компонента (3); б – профиля температуры в пласте от времени; 1 – $t = 210$ сут; 2 – 220; 3 – 230; 4 – 240; 5 – 250 сут; $\varphi_l = 0,7$

Fig. 14. Dependence: а – of coordinates of displacement (1), maximum temperature (2), solid component combustion (3); б – maximum reservoir temperature profile on time; 1 – $t = 210$ days; 2 – 220; 3 – 230; 4 – 240; 5 – 250 days; $\varphi_l = 0,7$

ВЫВОДЫ

1. Проведено моделирование инициирования температурного фронта в нефтесодержащем пласте в системе с осевой симметрией. Показано, что включение в модель процесса вытеснения жидкой компоненты снижает интенсивность тепловыделения, увеличивает время инициирования очага. Это связано с тем, что часть горючей компоненты эвакуируется из области горения и вытесняемая топливная компонента получает малое количество окислителя, по сути лишь остатки кислорода, не прореагировавшего с неподвижной топливной компонентой.

2. Расчеты показывают, что при рассмотрении задачи об инициировании очага внутрипластового горения достаточно задать соответствующую процессу концентрацию неподвижной горючей компоненты в пласте, поскольку учет подвижной компоненты существенно не влияет на точность определения времени его инициирования. Начальную концентрацию неподвижной горючей компоненты следует связать с такими параметрами, как коксуемость нефти и первоначальное содержание керогена в материнской породе.

3. Учитывая возможность моделирования динамики концентрационных фронтов в трехфазной системе, представляется интересной разработка методов нестационарного (периодического) дутья, что позволило бы накапливать твердую горючую компоненту (образующуюся за счет пиролиза нефти) в заданной области для управления динамикой фронта горения или ускорения процесса поджига.

4. В дальнейших исследованиях планируется учесть процесс образования твердой горючей компоненты при низкотемпературном пиролизе нефти, а также провести расчет в геометрии с плоской симметрией, соответствующей процессу распространения температурного фронта на значительном расстоянии от скважин.

5. Существенный интерес, с точки зрения устойчивости процесса, могут представлять расчет и детальный анализ относительного движения концентрационных, температурных фронтов и фронта вытеснения нефти. Данный вопрос станет предметом будущих исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шейнман, А. Б. Подземная газификация нефтяных пластов и термический способ добычи нефти / А. Б. Шейнман, К. К. Дубровой. М.: ОНТИ, 1934. 95 с.
2. Боксерман, А. А. Термогазовый метод увеличения нефтеотдачи / А. А. Боксерман // Георесурсы. 2007. Т. 22, № 3. С. 18–20.
3. Чарный, И. А. Подземная гидродинамика / И. А. Чарный. М.: Гостоптехиздат, 1963. 397 с.
4. Рубинштейн, Л. И. Температурные поля в нефтяных пластах / Л. И. Рубинштейн. М.: Недра, 1972. 276 с.
5. Муслимов Р. Х. Опыт применения тепловых методов разработки на нефтяных месторождениях Татарстана / Р. Х. Муслимов, К. М. Мусин, М. М. Мусин. Казань: Новое знание, 2000. 226 с.
6. Алдушин, А. П. К анализу режимов внутрипластового горения / А. П. Алдушин, Б. С. Сеплярский // Докл. АН СССР. 1980. Т. 255, № 3. С. 616–620.

7. Богданов, И. И. Численное исследование начального этапа и развитых режимов внутрислоевого горения / И. И. Богданов, Л. А. Чудов. М.: Изд. отдел ИПМ, 1983. (Препринт / Институт проблем механики; № 227.)
 8. Новожилов, Б. В. Условия теплового взрыва при вынужденной конвекции реагирующей смеси / Б. В. Новожилов, Н. Г. Самойленко, Г. Б. Манелис // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 5. С. 49–54.
 9. Пивушков, А. В. Режимы воспламенения гетерогенных систем / А. В. Пивушков, Н. И. Перегудов, Н. Г. Самойленко // Химическая физика. 2005. Т. 24, № 2. С. 82–87.
 10. Буркина, Р. С. Очаговое тепловое воспламенение реакционноспособного газа в инертной пористой среде / Р. С. Буркина // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 5. С. 41–48.
 11. Буркина, Р. С. Критические условия теплового взрыва пористого слоя / Р. С. Буркина, В. Г. Прокофьев // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44, № 3. С. 50–60.
 12. Козначеев, И. А. К вопросу об иницировании очага горения в нефтенасыщенном пласте / И. А. Козначеев, К. В. Добрего // Инженерно-физический журнал. 2013. Т. 86, № 6. С. 1301–1309.
 13. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович [и др.]. М.: Наука, 1980. 478 с.
 14. Akkutlu, I. Y. The Dynamics of In-Situ Combustion Fronts in Porous Media / I. Y. Akkutlu, Y. C. Yortsos // Combustion Flame. 2003. Vol. 134, No 3. P. 229–247.
- Поступила 10.10.2018 Подписана в печать 14.12.2018 Опубликована онлайн 30.01.2019

REFERENCES

1. Sheinman A. B., Dubrovai K. K. (1934) *Underground Gasification of Oil Reservoirs and the Thermal Method of Oil Production*. Moscow, United Scientific Publishing House. 95 (in Russian).
2. Bokserman A. A. (2007) Thermo-Gas Method of Enhanced Oil Recovery. *Georesursy = Georesources*, 22 (3), 18–20 (in Russian).
3. Charnyi I. A. (1963) *Underground Hydro- and Gas Dynamics*. Moscow, Gostoptekhizdat Publ. 397 (in Russian).
4. Rubinshtein L. I. (1972) *Temperature Fields in Oil Reservoirs*. Moscow, Nedra Publ. 276 (in Russian).
5. Muslimov R. Kh., Musin K. M., Musin M. M. (2000) *Experience of Application of Thermal Methods of Development in Oil Fields of Tatarstan*. Kazan, Novoe Znanie Publ. 226 (in Russian).
6. Aldushin A. P., Seplyarskii B. S. (1980) Towards the Analysis of Intra-Layer Combustion Modes. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 255 (3), 616–620. (in Russian).
7. Bogdanov I. I., Chudov L. A. (1983) *Numerical Study of the Initial Stage and Mature Modes of Intra-Layer Combustion*. Moscow, IPM Publishing Department (Preprint No 227, Institute for Problems in Mechanics) (in Russian).
8. Novozhilov B. V., Samoilenko N. G., Manelis G. B. (2005) Conditions of the Thermal Explosion under Forced Convection of a Reacting Mixture. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, (41) 5, 528–532. <https://doi.org/10.1007/s10573-005-0066-3>.
9. Pivushkov A. V., Peregudov N. I., Samoilenko N. G. (2005) Ignition Modes of Heterogeneous Systems. *Khimicheskaya Fizika = Russian Journal of Physical Chemistry B: Focus on Physics*, 24 (2), 82–87 (in Russian).
10. Burkina R. S. (2005) Hot-Spot Ignition of a Reactive Gas in an Inert Porous Medium. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, (41) 5, 521–527. <https://doi.org/10.1007/s10573-005-0065-4>.
11. Burkina R. S., Prokof'ev V. G. Critical Conditions of Thermal Explosion of a Porous Layer. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, (44) 3, 291–299. <https://doi.org/10.1007/s10573-008-0037-6>.
12. Koznacheev I. A., Dobrego K. V. A Contribution to the Problem of Initiation of a Combustion Source in an Oil-Saturated Bed. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 86 (6), 1385–1394. <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0964-2>.
13. Zel'dovich Ya. B., Barenblatt G. I., Librovich V. B., Makhviladze G. M. (1980) *Mathematical Theory of Combustion and Explosion*. Moscow, Nauka Publ. 478 (in Russian).
14. Akkutlu I. Y., Yortsos Y. C. (2003) The Dynamics of In-Situ Combustion Fronts in Porous Media. *Combustion Flame*, 134 (3), 229–247. [https://doi.org/10.1016/s0010-2180\(03\)00095-6](https://doi.org/10.1016/s0010-2180(03)00095-6).

Received: 10 October 2018 Accepted: 14 December 2018 Published online: 30 January 2019

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-61-76>

УДК 697.343

Численное исследование сложного теплообмена в продуваемых непроходных каналах теплотрасс

В. А. Седнин¹⁾, Т. В. Бубырь¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019

Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Для решения задачи повышения эффективности эксплуатации тепловых сетей, размещенных в непроходных каналах, ранее авторами предлагалось схемно-структурное решение регенеративно-утилизационного теплоиспользования. Представлена принудительная вентиляция канала наружным воздухом с последующим охлаждением воздуха и утилизацией отводимой теплоты. Определяющим для реализации данной технологии повышения эффективности эксплуатации рассматриваемых теплопроводов является исследование процессов теплообмена между потоком воздуха и трубопроводами сетевой воды, с одной стороны, и между потоком воздуха и стенками канала, с другой. Конвективный теплообмен с перечисленными составляющими конструкции канала достаточно сложно привести к той или иной канонической форме, позволяющей использовать имеющиеся расчетные зависимости. Несомненно сложнее найти решение при совместном рассмотрении протекающих процессов вынужденной конвекции. Теплообмен протекает в канале сложной формы, определяемой по длине канала наличием опор, компенсаторов и поворотов. В поперечном сечении размеры конструкции и стеснение потока воздуха определяются типоразмерным рядом диаметров трубопроводов сетевой воды. В этих условиях использование какой-либо реальной экспериментальной установки связано с неприемлемой идеализацией и соответствующей погрешностью, непригодной для практического применения. Натурные испытания могут рассматриваться только для проверки адекватности экспериментальных результатов. Выходом из этой ситуации может стать обращение к виртуальной экспериментальной установке, создаваемой на базе стандартного программного комплекса (в данном случае используется ANSYS). Рассмотрены подходы к созданию виртуальной экспериментальной установки для исследования теплообмена и аэродинамики в продуваемых непроходных каналах теплотрасс и методики проведения эксперимента с применением теории его планирования.

Ключевые слова: продуваемые непроходные каналы, конвективный теплообмен, теплотрасса, виртуальная экспериментальная установка, ANSYS

Для цитирования: Седнин, В. А. Численное исследование сложного теплообмена в непроходных каналах теплотрасс / В. А. Седнин, Т. В. Бубырь // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 1. С. 61–76. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-61-76>

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

Numerical Study of Complex Heat Transfer in Blown Impassable Channels of Heating Mains

V. A. Sednin¹⁾, T. V. Bubyr¹⁾

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

Abstract. To solve the problem of increasing the efficiency of operation of thermal networks, placed in impassable channels, the authors previously proposed the scheme-and-structural decision of the regenerative-utilization heat consumption. The technology of forced ventilation of the channel by external followed by the cooling of air and utilization of the withdrawn heat is presented. Research of processes of heat exchange between a stream of air and pipelines of network water on the one hand and between a stream of air and walls of the channel on another hand is a determinant for realization of the presented technology of increase of efficiency of operation of the considered heating mains. Convective heat transfer with the listed components of the channel structure is quite difficult to reduce to any canonical form which makes it possible to use the available design dependences. It is immeasurably more difficult to find a solution when considering the processes of forced convection jointly. Heat exchange takes place in a channel of complex shape that is determined by the presence of supports, compensators and turns along the length of the channel. In the cross section, the sizes of the structure and the restriction of the air flow are determined by a standard size range of diameters of the network water pipelines. Under these conditions, the use of any real experimental facility is associated with unacceptable idealization and the corresponding error, unsuitable for practical use. Full-scale tests can be considered only to verify the adequacy of the experimental results. The way out of this situation can be a usage of a virtual experimental facility created on the basis of a standard software package (in the case under consideration the ANSYS was used). The approaches of creating a virtual experimental facility for the study of heat transfer and aerodynamics in the blown impassable channels of heating mains and methods of conducting experiment using the theory of its planning are considered.

Keywords: blown impassable channels, convective heat transfer, heating main, virtual experimental facility, ANSYS

For citation: Sednin V. A., Bubyr T. V. (2019) Numerical Study of Complex Heat Transfer in Blown Impassable Channels of Heating Mains. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (1), 61–76. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-61-76> (in Russian)

Введение

Несмотря на современную тенденцию применения бесканальной прокладки теплопроводов, теплотрассы в непроходных каналах имеют достаточно большой удельный вес (около 50 %) в существующих системах централизованного теплоснабжения Беларуси. Учитывая высокую стоимость изготовления и прокладки теплопроводов, их полная замена с применением инновационных технологий в городах республики займет еще не одно десятилетие. Поэтому остаются актуальными разработка и исследование технологий повышения энергоэффективности эксплуатации теплопроводов в непроходных каналах. Востребованность подобных технологий определило появление ряда работ, непосредственно связанных с рассматриваемым исследованием [1–3]. Главным этапом разработки технологии, представленной в [1], является изучение теплообмена внутри канала между его конструкциями и потоком воздуха, продуваемого через канал. Характерные геометрические особенности объекта исследования представлены на рис. 1.

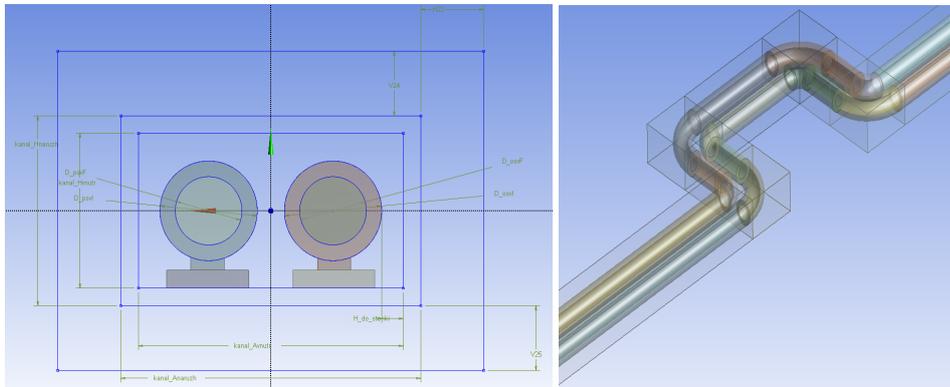


Рис. 1. Характерные геометрические особенности канала и теплопроводов

Fig. 1. Characteristic geometric features of the channel and heating mains

Значительная протяженность тепловых сетей делает перспективным использование теплоты грунта для повышения энергосбережения в системах централизованного теплоснабжения. При этом затраты, связанные с созданием соответствующей технической системы, оказываются несоизмеримо меньшими, чем в случае использования тепловой энергии грунта с помощью вертикальных или горизонтальных скважин, традиционно рассматриваемых в этих случаях. Прежде всего потому, что не требуется изымать из оборота большие площади для создания полей с подобными скважинами, которые в городских условиях из-за дороговизны земли делают проекты экономически нецелесообразными. Существенным ограничением, которое необходимо учитывать при использовании непроходных каналов в качестве устройств утилизации теплоты грунта, является выполнение нормативных требований в отношении расстояния между конструкциями тепловых сетей и существующими конструкциями других систем инфраструктуры города для исключения механических воздействий на конструкцию, вспучивания грунта при замораживании и др. Кроме того, темп изменения температур конструкции внутри канала должен соответствовать сохранению его долговечности.

Принципиальная схема непроходного канала теплотрассы с указанием основных материальных и тепловых потоков при прокачке воздуха показана на рис. 2. Исследование процессов аэродинамики и теплообмена в подобных объектах, имеющее своей целью получение приемлемой достоверности результатов, требует принципиально новых подходов. Одним из них является вычислительный эксперимент на основе применения методов конечных разностей, конечных и граничных элементов [4–8]. Универсальное решение – использование программного комплекса ANSYS, наиболее удобного из САЕ-систем, предназначенных для компьютерного моделирования и анализа различных физических процессов, в рамках которого удобно построить виртуальную экспериментальную установку.

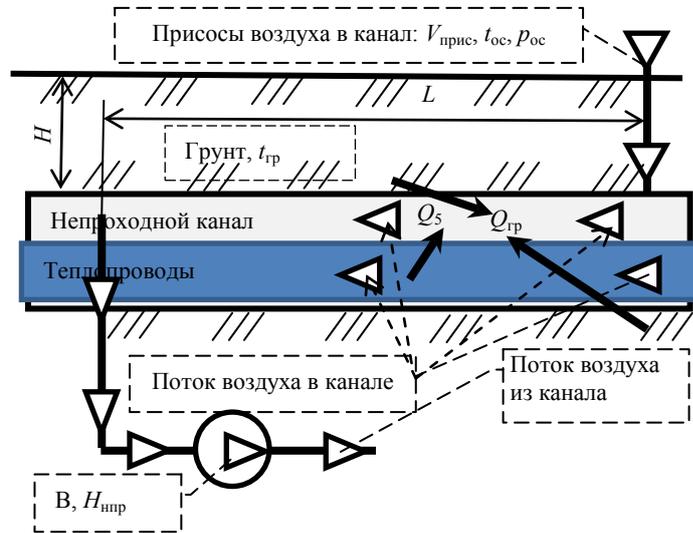


Рис. 2. Принципиальная схема тепловых потоков в продуваемом непроходном канале: H – заглубление канала, м; L – длина вентилируемого участка, м; B – вентилятор; $Q_5, Q_{гр}$ – поток рассеяния тепловой энергии трубопроводами сетевой воды и поток теплового взаимодействия со стенками канала, кДж/ч; $V_{прис}$ – расход воздуха, прокачиваемого на участке L канала, м³/ч; $t_{ос}, t_{гр}$ – температура окружающего наружного воздуха и стенок канала, °С; $p_{ос}$ – давление окружающей среды, кПа; $H_{нпр}$ – напор, обеспечиваемый вентилятором, кПа

Fig. 2. Schematic diagram of heat fluxes in ventilated impassable channel: H – depth of channel, m; L – length of ventilated area, m; B – ventilator; $Q_5, Q_{гр}$ – flux of scattering of thermal energy by network water pipelines and the flux of the thermal interaction with the walls of the channel, kJ/h; $V_{прис}$ – air flow that is pumped at the site L of the channel, m³/h; $t_{ос}, t_{гр}$ – temperature of ambient outdoor air and the walls of the channel, °C; $p_{ос}$ – ambient pressure, kPa; $H_{нпр}$ – pressure delivered by the ventilator, kPa

Достоинством инструментариев ANSYS является то, что они позволяют связывать и объединять различные приложения для расчета задач механики твердого тела, гидро- и газодинамики, теплообмена и электромагнетизма. С помощью программного комплекса ANSYS можно проводить численный анализ всего многообразия задач сплошных сред. Он предоставляет широкие возможности для подготовки геометрических и сеточных моделей с последующей обработкой результатов расчета. Программный комплекс ANSYS основан на эффективных алгоритмах, позволяющих существенно сократить время расчета ресурсоемких задач.

Описание экспериментальной виртуальной установки

Рабочая расчетная область модели, объединяющая канал и массив грунта вокруг него, приведена на рис. 3. Показана расчетная сетка в поперечном сечении и на фрагменте продольного сечения канала, в основе которой лежат конечные элементы, представленные каноническими формами: тетраэдрами, пирамидами, призмами, шестигранниками. Большая часть элементов была построена шестигранниками для получения структурированной сетки.

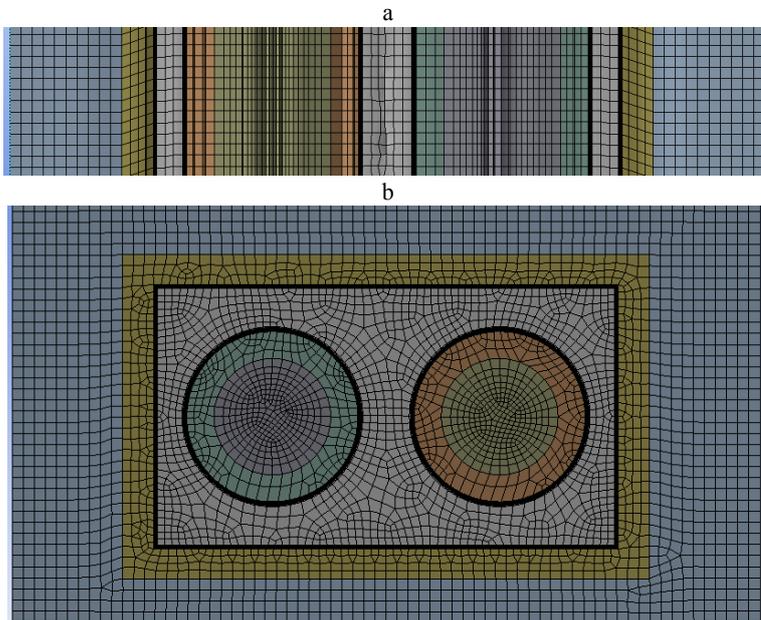


Рис. 3. Общий вид расчетной сетки, фрагменты сечения канала:
a – продольного; b – поперечного

Fig. 3. General view of the computational grid, fragments of the channel section:
a – longitudinal; b – transverse

Безусловным требованием, определяющим максимальный размер элемента и его каноническую форму, является выполнение сходимости процесса численного решения. Важный фактор построения сетки – соответствие канонической формы элементов разбиения сложности конструкции канала. Другое условие – обеспечение требуемой точности решения. Общее число элементов в модели колеблется от 5 до 15 млн ед. Достаточно большое количество элементов связано как с максимальной длиной участка (100 м), так и с максимальным поперечным сечением канала (лотка) (1,7×2,5 м). Кроме того, расчетное сечение включает грунт вокруг канала (на 0,5 м). При этом минимальная длина канала 20 м; размеры сечения 1,5×2,0 м. Вблизи поверхностей рассматриваемой геометрии укладывался тонкий слой призматических элементов толщиной, обеспечивающей безразмерный параметр y^+ , учитывающий структуру пограничного слоя. Величину указанного параметра рекомендуется принимать в диапазоне 30–100 [4]. Меньшее значение не допускается, поскольку пристенные функции, используемые в решателе ANSYS, дадут неверный результат. Значения, близкие к верхней границе диапазона, требуют меньших ресурсов, но приводят к снижению точности решения. В расчетах принята величина y^+ , равная 50. Сходимость процесса определялась по достижении совпадения соседних значений итераций величин температуры, напора, массового расхода, характеризующихся величиной менее 10^{-3} , что достигалось после 2000 итераций. Для решения использовался компьютер с 26 ядрами и 128 Гбайт ОЗУ. Геометрические размеры конструкций тепловых сетей определялись по действующим нормативным документам [9, 10].

В соответствии с описанными условиями расчеты с помощью программного комплекса ANSYS позволили получить следующие поля распределения скоростей, давления (рис. 4) и температуры (рис. 5) для тестовых экспериментов.

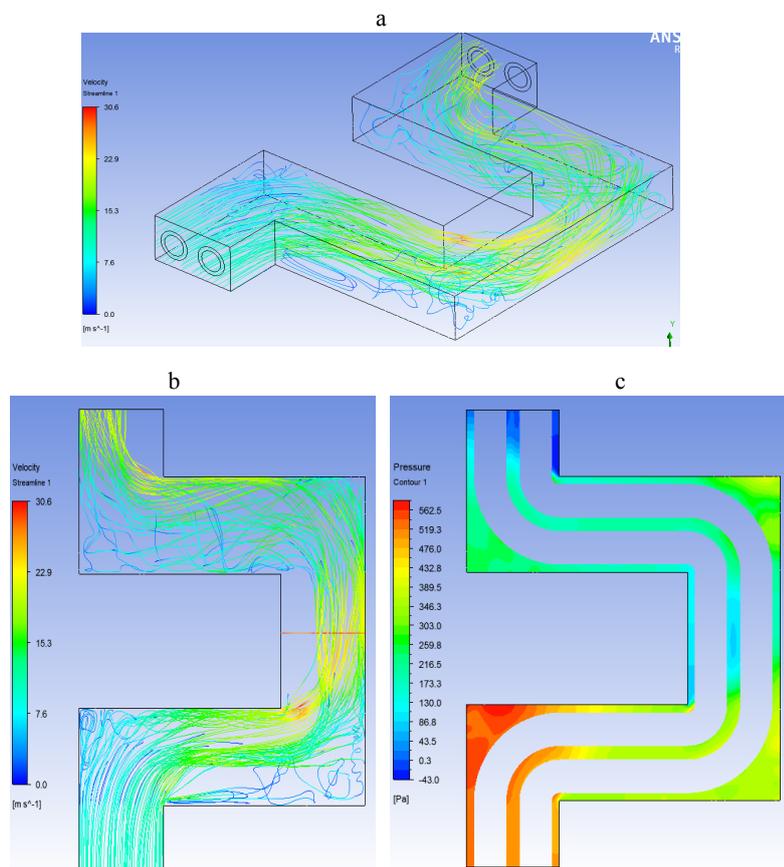


Рис. 4. Линии тока (a) и распределение скорости (b) и давления (c) в канале

Fig. 4. Current lines (a) and velocity (b) and pressure distribution (c) in the channel

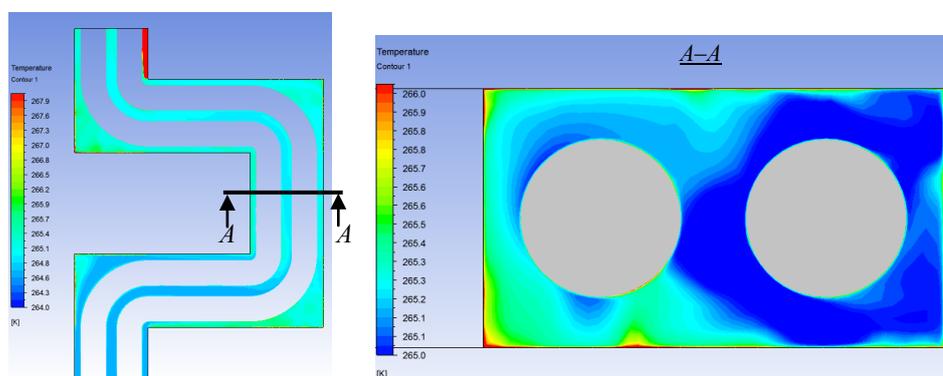


Рис. 5. Распределение температуры внутри канала

Fig. 5. Temperature distribution inside the channel

Анализ процессов теплопереноса, имеющих место при продувке канала воздухом

Массив грунта вокруг канала можно рассматривать как тепловой аккумулятор, а канал – как теплообменник, находящийся внутри аккумулятора. Здесь следует отметить, что сооружение подобного теплообменника не требует никаких дополнительных капитальных затрат, поскольку уже существует по факту. Очевидно, что температурное поле грунта в этом случае является нестационарным, при этом амплитуда изменения температуры быстро затухает по мере удаления от канала, а протяженность слоя, где имеет место упомянутое затухание, зависит от временного промежутка наблюдения. Для отрезков времени в пределах «месяц – сезон» величина слоя соответствует 1,0–2,0 м, для суточного отрезка она составляет не более 0,5 м [11]. В этом случае в течение суток можно рассматривать теплообмен при протекающих граничных условиях первого рода и принимать температуру грунта на удалении 0,5 м от стенки канала постоянной в диапазоне (7–13) °С. Многочисленные данные по температурам грунта, принимаемые в расчет при выборе грунтовых теплонасосных установок, весьма разнородны, что объясняется, с одной стороны, статистическим характером изменения свойств грунта, с другой – эпизодическим характером наблюдений [11]. В этом контексте и в связи с необходимостью учета изменений, оговоренных выше в отношении теплообмена по длине канала, наиболее взвешенным представляется решение об использовании температуры грунта с учетом времени года и глубины канала на базе средних статистических данных (рис. 6).

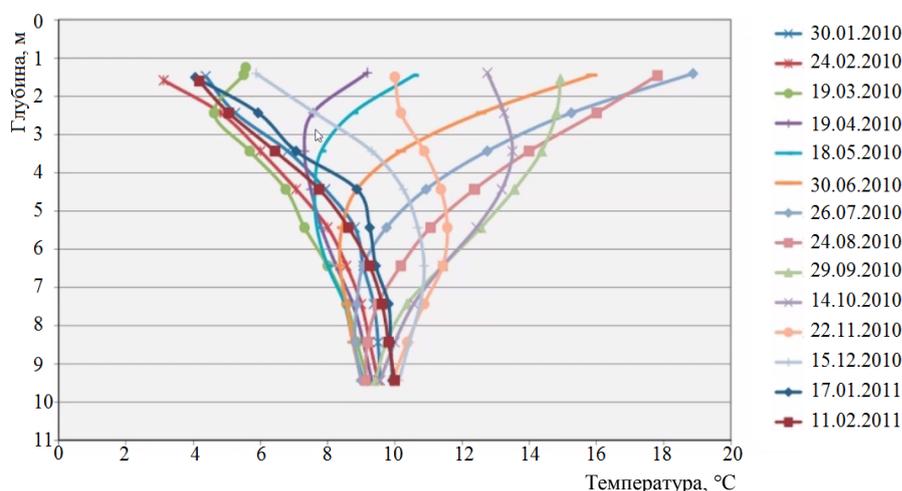


Рис. 6. Изменение температуры по глубине грунта в течение года

Fig. 6. Temperature change according to the depth of soil during a year

Приведенный выше диапазон температуры (7–13) °С соответствует обобщенным данным по глубинам расположения каналов и температуры грунтов на соответствующих глубинах. В пределах суток температурное

поле в грунте такого теплообменника можно считать постоянным, а его изменение во времени имеет место при переходе к следующим суткам.

Температуру грунта за пределами рассматриваемой зоны с учетом случайного ее изменения во времени и пространстве можно принимать согласно рекомендациям для выбранного региона [12]. Это позволяет упростить постановку задачи в целом, свести ее к стационарной, метрически трехмерной с коэффициентами, зависящими от определяющих температур.

Учитывая сложность задачи, решено провести численное исследование с применением методов математического планирования эксперимента, что позволяет снизить затраты на его проведение, с одной стороны, и привести полученные в ходе исследования результаты к виду, удобному для использования в инженерной практике, с другой.

Определение функций откликов, факторов и выбор плана проведения эксперимента

В соответствии с ранее поставленными задачами исследования в качестве функций откликов были приняты:

- абсолютная (Вт) и удельная (Вт/м) мощность интегрального потока теплоты для процессов теплопереноса, протекающих между потоком воздуха с трубопроводами сетевой воды и с грунтом через ограждающие конструкции канала;

- абсолютная (Вт) и удельная (Вт/м) мощность потока теплоты, рассеиваемой трубопроводами сетевой воды;

- абсолютная (Вт) и удельная (Вт/м) мощность потока теплоты процесса теплопереноса между грунтом, прилегающим к каналу, и воздухом, протекающим внутри канала;

- потери напора (Па) при движении потока воздуха внутри канала (являются одним из результатов работы программного комплекса ANSYS (рис. 4с)).

Мощность потоков теплоты определяется по выражению

$$Q = G \left(\overline{c_p} \Big|_0^{t_2} \cdot t_2 - \overline{c_p} \Big|_0^{t_1} \cdot t_1 \right), \quad (1)$$

где G – массовый расход теплоносителя, кг/с; $\overline{c_p} \Big|_0^t$ – изобарная удельная массовая средняя теплоемкость потока в интервале $0-t$, кДж/(кг·К): для потока воды (жидкая фаза) $c_p = 4,2$ кДж/(кг·К); t_1, t_2 – температура на входе и выходе исследуемого участка, °С.

Выбор факторов во многом определяют особенности экспериментальной установки, в том числе и виртуальной. Характеристики установки (аэродинамика и теплообмен) определяются в соответствии с условиями, имеющими место в действительности. На основании проведенного анализа исследуемых процессов в качестве набора параметров можно выделить следующие факторы, из которых далее необходимо выбрать значимые для исследования:

- характерный размер, определяющий геометрию канала в поперечном сечении $x_{\text{попр}}$, м;
- характерный размер, определяющий геометрию канала в продольном сечении $x_{\text{прод}}$, м;
- скорость потока воздуха в канале w , м/с;
- скорость сетевой воды w , м/с;
- температуру прямой $t_{\text{псв}}$ и обратной $t_{\text{осв}}$ сетевой воды, °С;
- температуру наружного воздуха $t_{\text{н.в.}}$, °С;
- температуру грунта на глубине залегания канала $t_{\text{гр}}$, °С.

Параметры геометрии канала. Прежде чем обратиться к непосредственному рассмотрению геометрии поперечного сечения канала с целью определения характерного размера, связанного с потоком воздуха в канале, отметим необходимость построения сетки конечных элементов пакета ANSYS, в том числе и непосредственно в ограждающей конструкции канала (бетонные стенки), и в прилегающем к каналу слое грунта, толщина которого доходит до 0,5 м [11]. С учетом этого слоя рассматривается геометрия поперечного сечения модели, необходимая для построения расчетной сетки.

Характерный размер сечения канала для прохода воздуха в контексте использования методов планирования эксперимента должен быть адаптирован к требованиям факторного анализа. Прежде всего его значения должны соответствовать реальным каналам, но и в расчетах величина характерного размера должна отвечать требованиям (управляемости и однозначности), устанавливаемым матрицей планирования эксперимента [13–17].

Для расчета характерного размера принимается сечение, свободное от опор трубопроводов (рис. 2, 3). Это оправдано, несмотря на то обстоятельство, что по факту имеет место достаточно частое расположение опор в непроходных каналах. Однако размеры аэродинамического следа [18, 19] за опорой и соответствующей зоной перед ней невелики и протяженность участков свободного течения доминирует, что позволяет считать выбранное сечение для расчета характерного размера поперечного сечения канала более взвешенным. В соответствии с его геометрией для характерного размера использовано известное соотношение для эквивалентного диаметра

$$x_{\text{попр}} = d_{\text{экв}} = 4F/P, \quad (2)$$

где F – живое сечение канала для прохода воздуха, $F = ab - \pi d^2/2$, м²; P – смоченный периметр канал, $P = 2(a + b + \pi d_{\text{из}})$, м; a , b – ширина и высота канала, м; $d_{\text{из}}$ – диаметр изолированного теплопровода по наружной образующей изоляции, м.

Для большей однозначности идентификации канала с помощью характерного размера проведена модификация последнего, исключившая ситуацию, когда несколько разных геометрий поперечного сечения могут иметь одинаковую величину $d_{\text{экв}}$, рассчитываемую по (2). Для этого введены поправки на стесненность потока в поперечном сечении по ширине и высоте канала в виде множителей $b/d_{\text{из}}$ и $a/d_{\text{из}}$. В результате получено соотношение

для характерного размера, определяющего геометрию канала в поперечном сечении:

$$x_{\text{попр}} = d_{\text{экв, мод}} = (b/d_{\text{из}})(a/d_{\text{из}})d_{\text{экв}}. \quad (3)$$

Таким образом, при проведении численного эксперимента устанавливаются абсолютные значения геометрических характеристик поперечного сечения непроходного канала с двухтрубной прокладкой трубопроводов сетевой воды, исходя из гаммы стандартных наборов геометрий поперечного сечения модифицированных характерных размеров, согласно (3). Соответствующие абсолютные значения модифицированных характерных размеров приведены в табл. 1.

Таблица 1

Абсолютные значения характерного размера поперечного сечения непроходного канала с двухтрубной прокладкой трубопроводов сетевой воды

Absolute values of the characteristic cross-sectional size of the impassible channel with two-pipe laying of network water pipelines

Эквивалентный диаметр канала для прохода потока воздуха, м	Поперечное сечение канала размерами, мм	Условный диаметр труб сетевой воды, мм	Характерный размер поперечного сечения канала, м
0,416	1500×900	300	0,191
0,522	2100×1200	500	0,255
0,834	2400×1800	700	0,333

В качестве характерного размера, определяющего геометрию канала в продольном сечении $x_{\text{прод}}$, очевидно следует выбрать длину теплопровода L . В части оценки длины расчетного участка теплопровода надо учитывать ограничения, связанные с возможностями, имеющимися в распоряжении вычислительных систем, и ресурсами в широком смысле слова. В этом контексте следует принимать разумный компромисс в определении диапазона изменения длины исследуемого участка. С увеличением длины канала линейно растет число конечных элементов, лежащих в основе численной модели. В рассматриваемом случае число упомянутых элементов при длине участка 1 км превышает 50 млн, что требует колоссальных ресурсов, не реальных для имеющейся в распоряжении вычислительной техники. В этой связи необходимы ограничения по длине участков, поэтому максимальная расчетная длина моделируемого канала была принята 100 м. При дальнейшей обработке и обобщении полученных результатов полезно убедиться в возможности суперпозиции результатов расчетов сопряженных участков ограниченной длины (до 100 м) теплотрассы, а также в возможности расчетов на единицу длины теплотрассы, что позволит разработать универсальную методику расчетов для каналов требуемой протяженности.

Еще одним проблемным вопросом остается учет местных сопротивлений при движении воздуха вдоль канала. Геометрия канала связана с наличием поворотов, компенсаторов и пр. Безусловно, в дополнение к влиянию геометрии поперечного и продольного сечений канала теплотрассы необ-

ходимо оценить влияние местных сопротивлений, прежде всего, поворотов опор, поворотов и П-образных компенсаторов для разных скоростей потока воздуха и различных характерных размеров. В дальнейшем на базе полученных результатов численного эксперимента следует оценить возможность введения поправочных коэффициентов, учитывающих наличие, количество и влияние перечисленных местных сопротивлений на конечные значения искомых величин.

Скорости сред. Диапазон изменений скорости воздуха невелик, его нижняя граница должна быть увеличена по двум причинам. Прежде всего, небольшая скорость воздуха уменьшает возможность утилизации потоков теплоты, отводимой от грунта и наружного воздуха, что обосновывает повышение минимальной скорости. Одновременно возрастание рассматриваемой характеристики, сопровождаемое отмеченным уменьшением диапазона исследуемого фактора, повышает вероятность достижения адекватности получаемых уравнений регрессии, что приемлемо при выполнении требований практического использования. Верхняя граница диапазона определена из практического опыта, согласно которому при скорости потока воздуха более 10 м/с возникает недопустимый уровень шума. Таким образом, скорость потока воздуха в исследовании предполагается изменять в диапазоне от 0,5 до 10,0 м/с. Шаг изменений будет определяться выбранной матрицей планирования эксперимента.

Скорость потока сетевой воды может быть принята постоянной и равной 1,5 м/с – близкой к средней из диапазона 0,5–3,0 м/с, используемого в реальных условиях.

Температуры сред. Для проведения численного эксперимента требуется определять значения температур грунта на глубине канала и потока наружного воздуха, поступающего в канал, прямой и обратной воды в соответствии с выбранным планом эксперимента. Анализ картины теплообмена между грунтом и воздухом, описываемой ранее, указывает на необходимость соблюдения условия, что в летнее время (межотопительный период) температура грунта ниже температуры наружного воздуха, в отопительный период – выше. Матрица планов эксперимента в ряде точек определяет набор сочетания факторов, который нарушает указанную физическую картину. Устранение данного противоречия можно обеспечить ограничением рассматриваемого промежутка времени только отопительным периодом. В межотопительном периоде изменяется подход использования тепловых потоков за счет утилизации теплоты охлаждения наружного воздуха, что составляет предмет отдельного исследования. Для соблюдения требований сочетания факторов во всех точках плана матрицы планирования эксперимента первым фактором берется температура грунта, изменяемая в диапазоне используемых глубин 1,0–3,5 м, отнесенная к средней глубине канала. Изменения температуры грунта в зависимости от времени года в расчетах принимаются в соответствии с рис. 6. Температуры грунта на глубине 1,0 м, соответствующей верхней поверхности виртуальной модели, и на глубине 3,5 м, согласно размерам виртуальной модели с учетом колебаний и глубины залегания и размеров каналов, могут устанавливаться по той же диаграмме для обозначенных глубин грунта.

Во всех случаях значения температуры грунта принимаются для боковой поверхности на глубине 2,25 м и составляют диапазон от 7 до 13 °С.

Другим фактором, влияние которого следует изучить, является температура окружающего воздуха, которая для Беларуси изменяется от 8 °С (начало отопительного периода) до –24 °С (максимальная расчетная температура).

Температуры прямой и обратной сетевой воды, используемые в качестве факторов, принимаются в соответствии с температурным графиком системы теплоснабжения. В тестовых расчетах они задавались согласно температурным графикам сетевой воды для централизованной системы теплоснабжения г. Витебска. Температура прямой сетевой воды является фактором матрицы планирования эксперимента. Принимается, что температура обратной сетевой воды соответствует температуре прямой сетевой воды согласно температурному графику. Проведенные расчеты в среде ANSYS показали, что с изменением температуры прямой и обратной сетевой воды в максимальных границах в соответствии с графиком изменяется температура нагрева воздуха на величину, которой нельзя пренебречь: поток теплоты к воздуху и изменение его температуры варьируются в пределах 36–57 %, что соответствует изменению температурного напора процесса теплопередачи от сетевой воды к воздуху в канале.

Выбор плана проведения численного эксперимента и кодирование факторов

Выбор плана большей частью определяется интуицией и опытом экспериментатора [15]. Максимальная точность в нахождении коэффициентов уравнения регрессии достигается в случае использования планов полного факторного эксперимента (ПФЭ) [16]. Эти планы удачны для линейных моделей, применяемых при решении задач оптимизации [17]. В рассматриваемом случае модель, предположительно, нелинейная, и на данном этапе требуется лишь корректное описание значений функций отклика в исследуемой области. Эти обстоятельства продиктовали выбор шестифакторного ротатабельного центрального композиционного плана (РЦКП). План включает ПФЭ только в вершинах гиперкуба. В звездных точках величина плеча, определяемая числом факторов и типом плана, составляет 2,3784, при этом значение факторов в этих точках не должно выходить за границы установленного диапазона изменения факторов. В центральной точке плана имеются два повторения.

Окончательные итоги определения уровней и диапазонов изменения факторов сведены в табл. 2, где приведены натуральные значения интервала варьирования каждого фактора как разница между его величиной на границах диапазона и на нулевом уровне, деленная на плечо звездных точек. В итоге, как видно, в звездных точках значения факторов не выходят за границы диапазона.

Матрица шестифакторного РЦКП приведена в [20] и содержит 46 точек. В каждой точке спектра плана проводят только один опыт, в вычислительных экспериментах опыты выполняют в соответствии с матрицей

спектра плана, так как предполагается отсутствие систематических ошибок, поэтому нет необходимости в рандомизации опытов [21].

Таблица 2

Уровни варьирования факторов
Levels of factor variation

Уровень	Фактор							
	X_1	X_2			X_3	X_4	X_5	X_6
	$x_{\text{прод}} = L, \text{ м}$	$x_{\text{попр}} = d_{\text{экв, мод}}, \text{ м}$			$w, \text{ м/с}$	$t_{\text{псв}} (t_{\text{осв}}), \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{н.в.}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{гр}}, \text{ }^\circ\text{C}$
	$a, \text{ м}$	$b, \text{ м}$	$d_{\text{изз}}, \text{ м}$					
-2,3784	20,0	0,093			0,50	65 (39)	-24,00	7,00
		1,00	0,46	0,266				
-1	43,2	0,191			3,25	79,5 (45)	-14,70	8,77
		1,50	0,90	0,557				
0	60,0	0,262			5,25	90 (49,5)	-8,00	10,00
		2,10	1,20	0,773				
1	76,8	0,333			7,25	100,5 (53)	-1,27	11,30
		2,40	1,80	0,928				
2,3784	100,0	0,43			10,00	115 (58)	8,00	13,10
		3,68	1,82	1,372				

Верификация модели

Верификация описанной модели на данном этапе выполнена на нулевом уровне. В требуемом объеме этот важнейший этап исследования будет выполняться постоянно далее по мере проведения расчетов согласно плану эксперимента. Следует отметить приемлемое соответствие результатов расчетов полученным значениям ручных прогонов и имеющимся в литературе данным о теплопотерях [9, 10, 22], потерях напора при продувке непроходных каналов [2], а также о тепловых режимах подземных коллекторов [3]. Наконец, анализ информации на рис. 4, 5, где показаны линии тока, распределение давления в канале и температуры внутри канала, указывает на их соответствие представлениям о протекающих физических процессах.

Так, согласно [10], расчетный коэффициент теплоотдачи от горизонтальных трубопроводов на открытом воздухе при скорости ветра 7 м/с составляет 22 Вт/(м²·°C). При продольном и поперечном омывании цилиндрических поверхностей с одинаковой скоростью интенсивность теплообмена выше в поперечном варианте. Из этого общеизвестного факта следует, что данные [10], где осреднены результаты набегания потока воздуха на трубопроводы под различными углами, в отношении величины коэффициента теплоотдачи должны превышать результаты расчета коэффициента теплоотдачи продольного омывания потоком воздуха теплопроводов сетевой воды в канале. Из результатов численных расчетов интенсивности теплоотдачи с помощью вышеописанной виртуальной экспериментальной модели получена величина коэффициента теплоотдачи 3,2 Вт/(м²·°C), что согласуется с изложенным представлением об их неизбежном несоответствии. Решение канонической задачи теплоотдачи при продольном протекании потока вдоль цилиндрического тела при тех же условиях дает вели-

чину коэффициента теплоотдачи $3,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$. Погрешность результатов расчета обоих вариантов составляет 15 %, и это достаточно хорошее совпадение. В рассматриваемой виртуальной установке имеют место отклонения от канонического продольного обтекания цилиндра, связанные с различными факторами (наличие двух параллельно расположенных труб, опор, обеспечивающих дополнительную турбулизацию потока). Это позволяет считать полученные результаты адекватными расчетам теплообмена с помощью программного пакета ANSYS в вышеописанной виртуальной экспериментальной установке.

Аналогичный вывод следует и в отношении определения потерь напора воздушного потока, продуваемого через канал. Потери напора, определенные в ходе тестовых численных экспериментов на представленной виртуальной экспериментальной установке с длиной канала 77 м и скоростью потока воздуха 7 м/с, составили 57 Па. При расчетах математической модели по общепризнанным методикам [19, 23] с использованием одинаковых величин всех требуемых характеристик получено значение потерь напора 64 Па, т. е. расхождение между результатами расчетов (контрольного – на базе [19, 23] и экспериментального – на виртуальной установке) составило 11 %.

Результаты начального этапа верификации модели допускают дальнейшую работу по решению задачи исследования процессов теплопереноса для разработки методики проектирования системы регенеративно-утилизационного теплоиспользования для теплотрасс в непроходных каналах.

ВЫВОДЫ

1. С помощью программного комплекса ANSYS создана виртуальная экспериментальная установка для исследования процессов аэродинамики и теплообмена в непроходных каналах. Выполненные тестовые численные эксперименты показали приемлемое совпадение результатов с физическими представлениями протекающих процессов.

2. Анализ процессов теплопереноса, имеющих место в непроходных каналах теплотрасс при реализации исследуемой технологии регенеративно-утилизационного теплоиспользования в системах централизованного теплоснабжения, позволил определить функции откликов и состав определяющих факторов. Обоснован выбор плана для дальнейшего численного эксперимента в виде шестифакторного ротатбельного центрального композиционного плана, определены уровни варьирования факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Седнин, В. А. Системы регенеративно-утилизационного теплоиспользования для теплотрасс в непроходных каналах / В. А. Седнин, Т. В. Бубырь // Энергия и Менеджмент. 2017. Т. 97, № 4. С. 2–6.
2. Марченко, А. В. Разработка технологий использования котлоагрегатов ТЭЦ и их дутьевых вентиляторов для транспорта и утилизации вентиляционных выбросов промышленных предприятий и автомагистралей / А. В. Марченко. Ульяновск, 2008. 175 с.
3. Титков, Д. Г. Разработка методики расчета теплового режима подземного коллектора для инженерных коммуникаций / Д. Г. Титков. М., 2017. 162 с.

4. Основы работы в ANSYS 17 / Н. Н. Федорова [и др.]. М.: ДМК Пресс, 2017. 210 с.
 5. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. 5-е изд. М.: Наука, 1977. 735 с.
 6. Самарский, А. А. Разностные методы решения задач газовой динамики / А. А. Самарский, Ю. П. Попов. М.: Наука, 1992. 424 с.
 7. Белоцерковский, О. М. Численное моделирование в механике сплошных сред / О. М. Белоцерковский. М.: Наука, 1984. 520 с.
 8. Зенкевич, О. С. Метод конечных элементов в технике / О. С. Зенкевич; пер. с англ. М.: Мир, 1975. 543 с.
 9. Тепловые сети. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-4.02-182-2009 (02250). Минск: Минстройархитектуры, 2010. 53 с.
 10. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Правила расчета: ТКП 45-4.02-129-2009 (02250). Минск: Минстройархитектуры, 2010. 52 с.
 11. Чудновский, А. Ф. Теплофизика почв / А. Ф. Чудновский. М.: Наука, 1976. 353 с.
 12. Об утверждении Методики по определению потерь тепловой энергии в сетях теплоснабжения с учетом их износа, срока и условий эксплуатации [Электронный ресурс]: постановление Комитета по энергоэффективности при Совете Министров Респ. Беларусь, 29 сент. 2006 г., № 2 // Электронная информационная система «Энергодokument». Режим доступа: <https://energodoc.by/file/fulltext-view/4690.pdf>. Дата доступа: 08.05.2017.
 13. Долгов, Ю. А. Методы обработки результатов пассивного эксперимента / Ю. А. Долгов, Т. В. Шестакова. Кишинев: Кишиневский политехнический институт имени С. Лазо, 1989. 32 с.
 14. Шестаков, В. Н. Планирование эксперимента в оптимизационных задачах технической мелиорации грунтов / В. Н. Шестаков. Омск: Изд-во «СибАДИ», 2007. 95 с.
 15. Тихомиров, В. Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в легкой и текстильной промышленности) / В. Б. Тихомиров. М.: Легкая индустрия, 1974. 262 с.
 16. Зедгинидзе, И. Т. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Т. Зедгинидзе. М.: Наука, 1976. 390 с.
 17. Новик, Ф. С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении. Раздел 2 / Ф. С. Новик. М.: МИСИ, 1970. 79 с.
 18. Управление аэродинамической тенью над брызгальными бассейнами АЭС. Гидродинамическое моделирование / В. Г. Бекетов [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. 2014. Т. 12, № 3. С. 78–84.
 19. Смыслов, В. П. Гидравлика и аэродинамика / В. В. Смыслов; пер. с укр., перераб. и доп. Киев: Вища шк., 1979. 336 с.
 20. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей / В. З. Бродский и [др.]. М.: Металлургия, 1982. 752 с.
 21. Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем / В. П. Тарасик. Минск: Новое знание, 2013. 584 с.
 22. Справочник по наладке и эксплуатации водяных тепловых сетей / В. И. Манюк [и др.]. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1982. 215 с.
 23. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик; под ред. М. О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
- Поступила 10.09.2018 Подписана в печать 14.11.2018 Опубликовано онлайн 30.01.2019

REFERENCES

1. Sednin V. A., Bubyr' T. V. (2017) Systems of Regenerative-Utilization Heat Consumption for Heat Pipelines in Impassable Channels. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], 97 (4), 2–6 (in Russian).
2. Marchenko A. V. (2008) *Development of Technologies for the Use of CHP Boilers and their Blowers for Transport and Utilization of Ventilation Emissions of Industrial Enterprises and Highways*. Ulyanovsk. 175 (in Russian).

3. Titkov D. G. (2017) *Development of Methods for Calculating the Thermal Conditions of the Underground Collector for Utilities*. Moscow, 162 (in Russian).
4. Fedorova N. N., Val'ger S. A., Danilov M. N., Zakharova Yu. V. (2017) *Basics of ANSYS 17 Use*. Moscow, DMK Press Publ. 210 (in Russian).
5. Tikhonov A. N., Samarskii A. A. (1977) *Equations of Mathematical Physics*. 5th ed. Moscow, Nauka Publ. 735 (in Russian).
6. Samarskii A. A., Popov Yu. P. (1992) *Difference Methods for Solving Gas Dynamics Problems*. Moscow, Nauka Publ. 424 (in Russian).
7. Belotserkovskii O. M. (1984) *Numerical Simulation in Continuum Mechanics*. Moscow, Nauka Publ. 520 (in Russian).
8. Zenkevich O. S. (1975) *Finite Element Method in Engineering, Translated from English*. Moscow, Mir Publ. 543 (in Russian).
9. ТКР 45-4.02-182–2009 (02250). (2010) *Heat Pipelines. Construction Design Standards*, Minsk, Ministry of Architecture and Construction. 53 (in Russian).
10. ТКР 45-4.02-129–2009 (02250). (2010) *Thermal Insulation of Equipment and Pipelines. Calculation Rules*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction. 52 (in Russian).
11. Chudnovskii A. F. (1976) *Thermophysics of Soils*. Moscow, Nauka Publ. 353 (in Russian).
12. On the Approval of the Technique for Determination of Losses of Thermal Energy in the Networks of Heat Supply Taking into Account their Wear, Term and Conditions of Operation: the Resolution of the Committee on Energy Efficiency of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, 29 Sept. 2006, No 2. *Electronic Information System "Energodokument"*. Available at: <https://energodoc.by/file/fulltext-view/4690.pdf>. (Accessed: 8 May 2017) (in Russian).
13. Dolgov Yu. A., Shestakova T. V. (1989) *Methods of Processing the Results of Passive Experiment*. Chisinau, The Polytechnic Institute S. Lazo of Chisinau. 32 (in Russian).
14. Shestakov V. N. (2007) *Planning of Experiment in Optimization Problems of Technical Soil Reclamation*. Omsk, Siberian State Automobile and Highway University Publ. 95 (in Russian).
15. Tikhomirov V. B. (1974) *Planning and Analysis of the Experiment (During Light and Textile Industries Research)*. Moscow, Legkaya Industriya Publ. 262 (in Russian).
16. Zedginidze I. T. (1976) *Planning an Experiment to Study Multicomponent Systems*. Moscow, Nauka Publ. 390 (in Russian).
17. Novik F. S. (1970) *Mathematical Methods of Planning Experiments in Metal Science. Section 2*. Moscow, Moscow Institute of Civil Engineering. 79 (in Russian)
18. Beketov V. G., Kol'chenko O. L., Domrina G. V., Matevosyan Yu. M. (2014) Control of the Wind Shadow over the Spray Ponds of Nuclear Power Plants. Hydrodynamic Simulation. *Global'naya Yadernaya Bezopasnost' = Global Nuclear Safety*, 12 (3), 78–84 (in Russian).
19. Smyslov V. P. (1979) *Hydraulics and Aerodynamics*. Kiev, Vishcha Shkola Publ. 336 (in Russian).
20. Brodskii V. Z., Brodskii L. I., Golikova T. I., Nikitina E. P., Panchenko L. A. (1982) *Tables of Experiment Plans for Factorial and Polynomial Models*. Moscow, Metallurgiya Publ. 752 (in Russian).
21. Tarasik V. P. (2013) *Mathematical Modeling of Technical Systems*. Minsk, Novoe Znanie Publ. 584 (in Russian).
22. Manyuk V. I., Kaplinskii Ya. I., Khizh E. B., Manyuk A. I., Il'in V. K. (1982) *Guide for Setting up and Operation of the Water Heating Systems*. 2nd ed., Revised and Supplemented. Moscow, Stroiizdat Publ. 215 (in Russian).
23. Idel'chik I. E. (1992) *Handbook of Hydraulic Resistances*. 3rd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ. 672 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87>

УДК 658.261:621.56

Турбодетандерная установка на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты

А. В. Овсянник¹⁾

¹⁾Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого (Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Представлена схема когенерационной и тригенерационной установки на диоксиде углерода с использованием вторичных энергоресурсов в виде продуктов сгорания или дымовых газов, позволяющая одновременно производить электроэнергию, тепловую энергию и холод для централизованного и децентрализованного снабжения потребителей. Кроме того, на установке возможно производство жидкой и газообразной углекислоты. Основными элементами установки являются теплофикационный блок, турбодетандерный агрегат и углекислотный блок для производства холода, жидкой и газообразной углекислоты. Проведены термодинамический расчет и краткий эксергетический анализ установки. В предлагаемой установке в качестве вторичных энергоресурсов могут использоваться отходящие газы от стеклоплавильных, металлургических печей, теплоэнергетических установок и других энергетических объектов с температурой вторичных энергоресурсов 250–400 °С и выше. Теплофикационный блок установки предназначен для получения тепловой энергии для систем отопления и горячего водоснабжения, углекислотный блок – для получения холода, электрической энергии и диоксида углерода в жидком и газообразном виде для обеспечения работы установки и использования в коммерческих целях. Холод в установке может быть получен в двух испарителях, работающих при различных температурах кипения. При более высокой температуре кипения диоксида углерода холод используется в системах кондиционирования воздуха и централизованных системах охлаждения и хранения продукции, а при более низкой температуре кипения диоксида углерода – в системах замораживания и хранения. Для осуществления обратного углекислотного цикла применяется трехступенчатый углекислотный компрессор с ресивером после третьей ступени. Для снижения работы сжатия компрессора должно быть предусмотрено полное промежуточное охлаждение диоксида углерода между ступенями.

Ключевые слова: когенерационная и тригенерационная установки, турбодетандер, продукты сгорания, электроэнергия, тепловая энергия, холод, диоксид углерода

Для цитирования: Овсянник, А. В. Турбодетандерная установка на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты / А. В. Овсянник. *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 1. С. 77–87. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87>

Адрес для переписки

Овсянник Анатолий Васильевич
Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого,
просп. Октября, 48,
246746, г. Гомель, Республика Беларусь
Тел.: +375 232 40-20-36
ovsyannik@tut.by

Address for correspondence

Ovsyannik Anatolii V.
Sukhoi State Technical
University of Gomel
48 October Ave.,
246746, Gomel, Republic of Belarus
Tel.: +375 232 40-20-36
ovsyannik@tut.by

Carbon Dioxide Turbine Expander Plant Producing Liquid and Gaseous Carbon Dioxide

A. V. Ovsyannik¹⁾

¹⁾Sukhoi State Technical University of Gomel (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. The scheme of carbon dioxide cogeneration and trigeneration plant with the use of secondary energy resources in the form of combustion products or flue gases that enables to produce electricity, thermal energy and cold for centralized and decentralized supply of consumers simultaneously, is presented. In addition, the plant can produce liquid and gaseous carbon dioxide. The main elements of the plant are a heating unit, a turbodetander unit and a carbon dioxide unit for the production of cold, liquid and gaseous carbon dioxide. A thermodynamic calculation and a brief exergy analysis of the plant were carried out. In the proposed plant, off-gases from glass-melting, metallurgical furnaces, heat power facility and other energy facilities with a secondary energy temperature of 250–400 °C and above can be used as secondary energy resources. The heating unit of the installation has been designed to produce thermal energy for heating and hot water supply systems. The carbon dioxide unit has been designed for the production of cold, electric energy and carbon dioxide in liquid and gaseous form in order to ensure the operation of the plant and the use for commercial purposes. The cold in the plant can be obtained in two evaporators operating at different boiling temperatures. At a higher boiling point of carbon dioxide, cold is used in air conditioning systems and in centralized cooling and storage systems, while at a lower boiling point of carbon dioxide – in freezing and storage systems. For the implementation of the reverse carbon dioxide cycle, a three-stage carbon dioxide compressor with a receiver after the third stage is used. To reduce compression performance of the compressor, complete intermediate cooling of carbon dioxide between stages should be provided.

Keywords: cogeneration and trigeneration plants, turboexpander, combustion products, electric power, thermal energy, cold, carbon dioxide

For citation: Ovsyannik A. V. (2019) Carbon Dioxide Turbine Expander Plant Producing Liquid and Gaseous Carbon Dioxide / A. V. Ovsyannik // *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (1), 77–87. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87> (in Russian)

Введение

В настоящее время все больше внимания уделяется поиску как можно более эффективных и безопасных рабочих тел для энергетических установок прямого и обратного циклов. Одни из таких рабочих тел – природные хладагенты и, в частности, диоксид углерода [1, 2].

Точка зрения о вреде фреонов и пользе натуральных хладагентов ныне является доминирующей как в Евросоюзе, так и в мире. Соответствующие законы в Евросоюзе уже приняты и исполняются; все крупные европейские компании давно вписали холодильные системы на CO₂ в свои технические задания и проектные решения, а сейчас, спустя несколько лет после первых успешных внедрений таких установок, в крупных компаниях идет тиражирование ранее отработанных решений.

На практике это означает, что, приходя на рынки различных стран, компании приносят с собой обкатанные в Европе технические решения, среди которых находится CO₂ [3]. И хотя при использовании диоксида углерода возникает ряд технических проблем, существуют адекватные пути их решения. Еще 100 лет назад умели управляться со «стояночным давлением» и не боялись «критической точки». Не стоит бояться этого и сейчас. Можно определенно надеяться, что системы на CO₂ по мере роста их числа

и вывода из оборота фреоновых компонентов станут дешевле фреоновых аналогов и, что не менее важно, экологически более привлекательными и безопасными [3].

Приняв экологически грамотное решение, владельцы холодильных и энергетических систем в обозримом будущем могут избежать законодательного и надзорного давления, а также связанной с этим необходимости менять оборудование, т. е. через несколько лет решение окажется экономически грамотным [3].

Основные преимущества применения CO_2 в холодильной технике в сравнении с ГФУ-хладагентами – их эффективность, безопасность, экологичность и низкая стоимость, а также соответствие самым последним тенденциям в законодательстве [2].

Говоря о преимуществах CO_2 , важно отметить, что этот хладагент обладает рядом особенностей. В отличие от традиционных хладагентов CO_2 , помимо более высокой области рабочих давлений, имеет высокую тройную и низкую критическую точки. Тройную точку CO_2 (минус 56,6 °C; 5,2 бар), на практике связанную с выпадением «сухого льда», следует учитывать при установке и обслуживании системы. Учет критической точки CO_2 (плюс 31,1 °C; 73,6 бар) важен как при обслуживании, так и при проектировании систем на диоксиде углерода.

В зависимости от назначения и типа систем проектные давления CO_2 могут изменяться в диапазоне от 40 до 140 бар. При этом в промышленном холоде используются субкритические системы, а в коммерческом популярны как субкритические, так и транскритические установки [3].

Диоксид углерода может быть также использован как самостоятельный хладагент. Компрессорно-конденсаторные агрегаты в этом случае работают с большей эффективностью, чем агрегаты на фреонах в холодном и умеренном климате. Все три варианта, т. е. системы непосредственного охлаждения на углеводородах, системы с промежуточным холодоносителем и пароконденсационные системы на CO_2 , технически осуществимы, что подтверждается успешной их реализацией в промышленности [2, 3].

При применении CO_2 как хладагента для небольших систем непосредственного охлаждения годовое энергопотребление в умеренном климате обычно меньше, чем при использовании фреонов (ГФУ) [3]. Энергоэффективность стандартной системы на CO_2 выше, чем системы на ГФУ при наружной температуре ниже 22 °C, почти эквивалентна ей при температуре от 22 до 26 °C и ниже при более высокой температуре. Техническая осуществимость таких систем проверена более чем на 4000 работающих системах в Европе, еще на 1000 – в Азии и Австралии и более чем на 100 – в Северной Америке (на 2014 г.). Эффективность систем на CO_2 может быть повышена внедрением таких новых разработок, как эжекторные системы и расширительные машины (детандерные), причем настолько, что данные системы будут более эффективными даже в жарком климате [3].

Преимущества CO_2 перед ГФУ-хладагентами, такие как эффективность, безопасность, экологичность, низкая стоимость и соответствие самым последним тенденциям, в законодательстве рассмотрены в [2].

На основании рассмотренных энергетических, технических и экологических предпосылок использования CO_2 в энергетических установках для

получения тепловой энергии и холода предлагается использование диоксида углерода для получения электрической и тепловой энергии и холода в детандерном цикле. Отличительной особенностью такой установки является то, что используется только один хладагент – CO_2 .

Схема и принцип работы установки

Схема когенерационной установки на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты представлена на рис. 1 [4–6], где 1 – источник продуктов сгорания; 2 – абсорбер; 3 – десорбер; 4 – брызгоотделитель; 5 – осушитель; 6 – инжектор; 7 – ресивер; 8 – компрессор; 9, 13 – конденсатор; 10 – перегреватель; 11 – испаритель; 12 – паровая турбина (турбодетандер); 14 – электрогенератор; 15, 16, 17, 18 – насос; 19 – сборник; 20, 21 – дроссельное устройство; 22 – сепаратор 1; 23 – сепаратор 2; 24, 25, 26 – теплообменник.

Принцип работы предлагаемой установки основан на использовании теплоты отходящих продуктов сгорания (металлургических, стеклоплавильных печей, котлоагрегатов и т. д.) [7, 8] с целью повышения энергетической эффективности теплоэнергоустановок и снижения их тепловых потерь. Кроме того, решается экологическая проблема улавливания диоксида углерода и предотвращения выброса его в окружающую среду. Предлагаемая установка может работать на вторичных энергоресурсах, которые в настоящее время используются в крайне ограниченных объемах [7].

Установка подключается через теплофикационный узел, состоящий из двух теплообменников 24 и 25, к источнику продуктов сгорания или дымовых газов. В теплообменниках теплофикационного узла происходит их охлаждение до требуемой температуры, после чего продукты сгорания поступают последовательно в абсорбер с поглощением газообразной углекислоты из продуктов сгорания и десорбер, где осуществляется выделение из абсорбента CO_2 . Затем углекислый газ поступает через брызгоотделитель и осушитель в инжектор, где инжектируется в линейный ресивер, при этом его давление повышается до давления всасывания в компрессоре первой ступени. После трехступенчатого компрессора газообразный CO_2 направляется в конденсатор 9, охлаждается и поступает на первое дросселирование в дроссельное устройство 20, после которого температура и давление CO_2 снижаются, и далее – в сепаратор 22. Отделившаяся в сепараторе жидкая фаза CO_2 поступает на второе дросселирование в дроссельное устройство 21, где опять происходит снижение температуры и давления. Жидкий диоксид углерода из сепаратора 23 подается в конденсатор 13 турбогенераторной установки, кипит, поглощая теплоту конденсации газообразного CO_2 после его расширения в турбодетандере. Образовавшийся в результате кипения CO_2 газ направляется в инжектор, инжектирует газообразный CO_2 после десорбера и накапливается в линейном ресивере. Часть жидкой углекислоты после сепаратора 23 подается на конденсатор 9 для конденсации сжатого газообразного CO_2 после компрессора. Теплообменники 24 и 25 теплофикационного узла предназначены для подогрева сетевой воды для целей отопления и горячего водоснабжения.

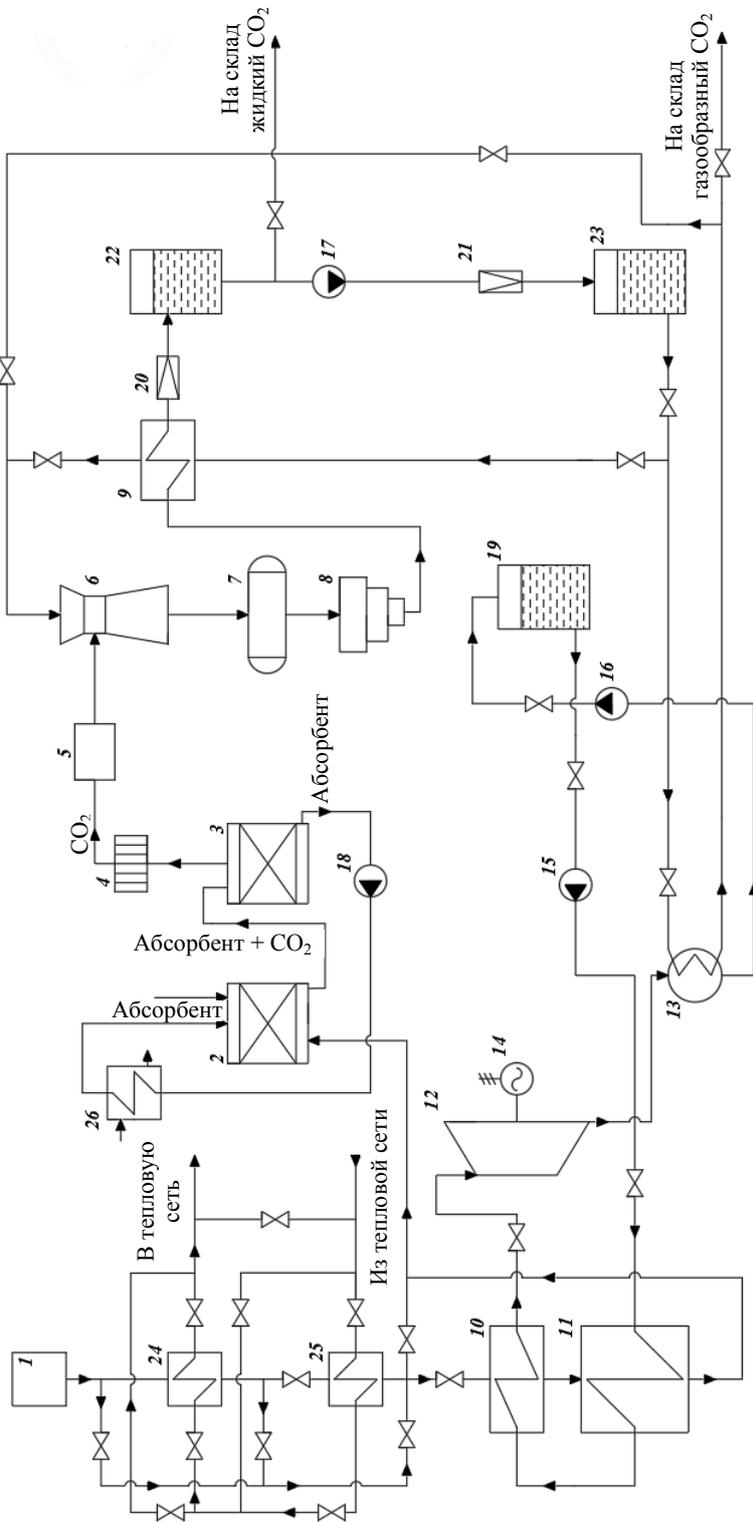


Рис. 1. Схема когенерационной установки с производством жидкой и газообразной углекислоты

Fig. 1. The scheme of the cogeneration plant producing liquid and gaseous carbon dioxide

Из ресивера-накопителя 19 жидкий CO_2 подается насосом 15 последовательно в испаритель и перегреватель, где испаряется и перегревается до необходимой температуры, после чего поступает на турбодетандер, расширяется, конденсируется в конденсаторе 13 и насосом 15 опять подается в ресивер-накопитель 19. Турбодетандерный контур (турбодетандер – испаритель – перегреватель – конденсатор 13 – насос 15 – ресивер-накопитель 19) может работать как на цикле с докритическими, так и на цикле с закритическими (транскритическими) параметрами. На схеме не показано охлаждение газообразного CO_2 после сжатия в первой и во второй ступенях компрессора.

Теоретические циклы турбодетандерного и углекислотного контуров в диаграмме $\lg p - h$ с полным промежуточным охлаждением представлены на рис. 2.

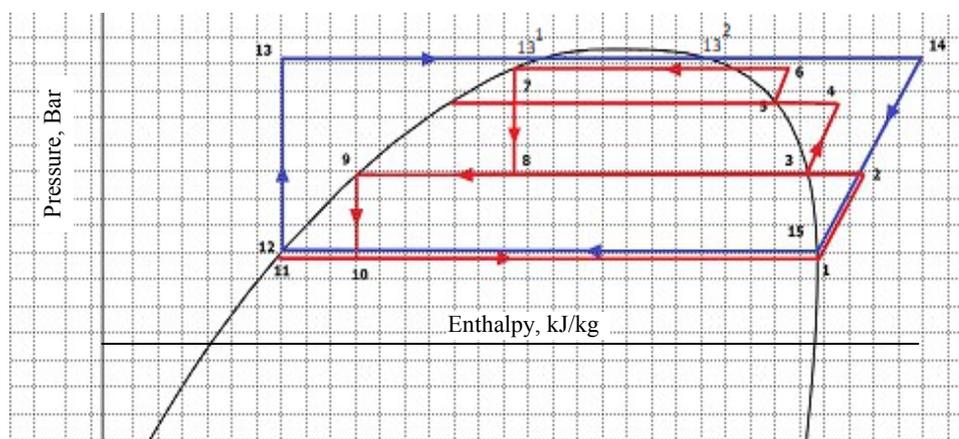


Рис. 2. Цикл турбодетандерной когенерационной установки на диоксиде углерода

Fig. 2. The cycle of turbo-expander carbon dioxide cogeneration plant

Циклы на рис. 2 состоят из следующих процессов: 12–13 – повышение давления жидкого CO_2 в насосе 15 (рис. 1); 13–13¹ – нагрев жидкого CO_2 до температуры кипения в испарителе; 13¹–13² – изобарно-изотермический процесс кипения CO_2 в испарителе; 13–14 – перегрев газообразного CO_2 в перегревателе; 14–15 – адиабатное расширение газообразного CO_2 в турбодетандере; 15–12 – изобарно-изотермический процесс конденсации диоксида углерода в конденсаторе 13. Процессы для холодильного цикла (рис. 2): 1–2 – адиабатное сжатие газообразного CO_2 в компрессоре первой ступени; 2–3 – охлаждение CO_2 перед компрессором второй ступени; 3–4 – адиабатное сжатие CO_2 в компрессоре второй ступени; 4–5 – промежуточное охлаждение CO_2 перед компрессором третьей ступени; 5–6 – адиабатное сжатие CO_2 в компрессоре третьей ступени; 6–7 – охлаждение и конденсация газообразного CO_2 в конденсаторе 9; 7–8 – первое адиабатное дросселирование жидкого диоксида углерода в дроссельном устрой-

стве 20 в сепаратор 22; 9–10 – второе адиабатное дросселирование CO_2 в дроссельном устройстве 21 в сепаратор 23; 11–1 – кипение жидкого CO_2 в конденсаторе-испарителе 13.

Термодинамический расчет и анализ цикла турбодетандерной установки

При расчете и анализе цикла турбодетандерной установки необходимо рассмотреть прямой цикл генерации тепловой и электрической энергии в теплофикационном и турбодетандерном контурах, а также обратный трехступенчатый цикл производства жидкой и газообразной углекислоты. Представленная на рис. 3 установка может работать как в режиме когенерации энергии, так и в режиме тригенерации.

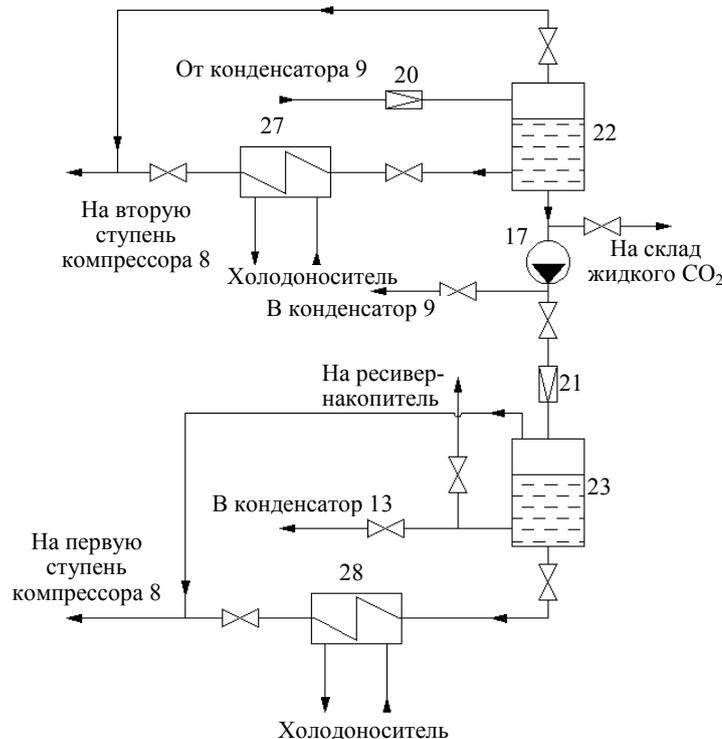


Рис. 3. Схема тригенерации энергии турбодетандерной установки на диоксиде углерода:

8, 9, 13, 17, 22, 23 – см. рис. 1; 20, 21 – дроссельное устройство;

27, 28 – испаритель второй и первой ступеней углекислотной установки

Fig. 3. The scheme of energy trigeneration of a carbon dioxide turbodetander unit:

8, 9, 13, 17, 22, 23 – see fig. 1; 20, 21 – choke device;

27, 28 – evaporator of the second and first stages of the carbon dioxide plant

Тригенерационная установка дополнительно включает в себя испарители 27 и 28 [9]. Испаритель 28 работает при температуре кипения T_{01} , соответствующей давлению насыщения p_{01} , а испаритель 27 – при температуре

кипения T_{02} , соответствующей давлению p_{02} . Газообразный CO_2 из сепаратора 22 и испарителя 27 и из сепаратора 23 и испарителя 28 поступает соответственно на вторую и первую ступени компрессора [9].

Рассмотрим термодинамический расчет когенерационной установки, представленный на рис. 1.

Удельная работа сжатия газообразного CO_2 в трехступенчатом компрессоре

$$l_s^k = (h_2 - h_1) + (h_4 - h_3) + (h_6 - h_5). \quad (1)$$

Удельная работа расширения газообразного CO_2 в турбодетандере

$$l_s^d = h_{14} - h_{15}. \quad (2)$$

Теоретическая (адиабатная) мощность сжатия CO_2 в компрессоре

$$N_t^k = G_d^k l_s^k. \quad (3)$$

Индикаторная мощность, потребляемая компрессором:

$$N_i^k = N_t^k / \eta_i = G_d^k l_s^k / \eta_i, \quad (4)$$

где η_i – индикаторный КПД компрессора.

Эффективная мощность (на валу) компрессора

$$N_b^k = N_i^k / \eta_m = G_d^k l_s^k / \eta_i \eta_m, \quad (5)$$

где η_m – механический КПД компрессора, учитывающий трение.

Электрическая мощность, потребляемая из сети компрессором:

$$N_3^k = N_b^k / \eta_n \eta_{дв} = G_d^k l_s^k / \eta_i \eta_m \eta_n \eta_{дв}, \quad (6)$$

где η_n – КПД передачи; $\eta_{дв}$ – то же электродвигателя компрессора.

Электрическая мощность, полученная в генераторе турбодетандера:

$$N_3^d = N_t^d / \eta_i \eta_m \eta_n \eta_r = G_d^d l_s^d / \eta_i \eta_m^d \eta_n \eta_r, \quad (7)$$

где G_d^d – действительный расход CO_2 через турбодетандер; η_r – КПД генератора; η_m^d – то же механический турбодетандера.

Предлагаемая установка предназначена в основном для производства электроэнергии на собственные нужды. Она должна оцениваться по тому, насколько покрывается потребность производства выработанной электроэнергией. Излишки выработанной электроэнергии могут выдаваться во внешнюю сеть, а ее недостаток – покрываться из внешней сети.

Турбодетандерная установка может работать и в режиме тригенерации энергии, если включить в схему испарители на первой и второй ступенях компрессора. Таким образом, холод может быть получен в двух испарителях: на более низком температурном уровне при температуре кипения T_{01} в испарителе 28 (рис. 3) и на высоком температурном уровне при температуре кипения T_{02} в испарителе 27. Удельная массовая холодопроизводительность испарителей 28 и 27 соответственно:

$$q_{01} = h_9 - h_3; \quad (8)$$

$$q_{02} = h_{11} - h_1. \quad (9)$$

Эксергетический КПД установки определяется по известному выражению [10]

$$\eta_e = \frac{\sum E_{\text{ВЫХ}}}{\sum E_{\text{ВХ}}}, \quad (10)$$

где $\sum E_{\text{ВХ}}$ – сумма эксергий всех потоков на входе в установку; $\sum E_{\text{ВЫХ}}$ – то же всех полезно используемых потоков на выходе из установки [1, 10].

Под полезно используемыми потоками эксергии понимаются электрическая и тепловая энергия в когенерационной установке (рис. 1) и электрическая и тепловая энергия и холод в тригенерационной установке (рис. 1, 3).

Для когенерационной установки (рис. 1) входящими являются потоки вторичных энергоресурсов в теплообменник 25 и испаритель 11.

Входящими потоками эксергии для тригенерационной установки (рис. 3), помимо вышеперечисленных, будут еще потоки холодоносителей в испарители 27 и 28.

Выходящие потоки эксергии для когенерационной установки:

- тепловая энергия из контура теплоснабжения;
- электрическая энергия, полученная в турбодетандере.

Выходящие потоки эксергии для тригенерационной установки:

- тепловая энергия из контура теплоснабжения;
- электрическая энергия, полученная в турбодетандере;
- холодильные мощности, выходящие из испарителей 27 и 28 [9].

Таким образом, эксергетические КПД [1, 10] для:

- когенерационной установки

$$\eta_e = \frac{\sum E_{\text{ВЫХ}}}{\sum E_{\text{ВХ}}} = \frac{E_{\text{теп}} + E_{\text{эл}}}{E_{\text{вт.тт}} + E_{\text{вт.тэ}}}, \quad (11)$$

– тригенерационной установки

$$\eta_e = \frac{\sum E_{\text{ВЫХ}}}{\sum E_{\text{ВХ}}} = \frac{E_{\text{ТЕП}} + E_{\text{ЭЛ}} + E_{\text{ХОЛ}}}{E_{\text{ВТ.ТТ}} + E_{\text{ВТ.ТЭ}} + E_{\text{ХЛ}}}. \quad (12)$$

ВЫВОДЫ

1. Разработана схема когенерационной и тригенерационной установки на диоксиде углерода с использованием вторичных энергоресурсов в виде продуктов сгорания или дымовых газов. Представлен цикл работы тригенерационной установки на докритических параметрах с производством жидкой и газообразной углекислоты. Холод, произведенный на тригенерационной установке, может быть использован в летний период при холодоснабжении систем вентиляции и кондиционирования воздуха промышленных и общественных зданий и сооружений.

2. Приведены методика термодинамического расчета цикла и его эксергетический анализ. Эксергетический КПД тригенерационной установки для производства тепловой, электрической энергии и холода превосходит аналогичный показатель традиционной когенерационной установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клименко, А. В. Возможность применения холода и дополнительной электроэнергии на тепловой электростанции / А. В. Клименко, В. С. Агабабов, П. Н. Борисова // Теплоэнергетика. 2017. № 6. С. 30–37. <https://doi.org/10.1134/s0040601517060015>.
2. Преимущества CO₂ в холодильной технике (по материалам JARN) // Холодильная техника. 2016. № 3. С. 25.
3. Современные альтернативные хладагенты на длительную перспективу и их возможные области применения (по материалам JARN) // Холодильная техника. 2016. № 6. С. 4–9.
4. Агабабов, В. С. О применении детандер-генераторных агрегатов в газовой промышленности / В. С. Агабабов // Энергосбережение и энергосберегающие технологии в энергетике газовой промышленности: материалы науч.-техн. совета ОАО «Газпром», Москва, нояб. 2000 г. М.: ИРЦ «Газпром», 2001. Т. 2. С. 50–53.
5. Агабабов, В. С. Бестопливные установки для производства электроэнергии, теплоты и холода на базе детандер-генераторных агрегатов / В. С. Агабабов // Новости теплоснабжения. 2009. № 1. С. 48–50.
6. Бестопливная установка для централизованного комбинированного электро- и хладоснабжения: полезная модель RU № 158931 / В. С. Агабабов, Ю. О. Байдакова, А. В. Клименко, У. И. Смирнова, Р. Н. Такташев. 20.01.2016.
7. Беспалов, В. В. Исследование и оптимизация глубины утилизации тепла дымовых газов в поверхностных теплообменниках / В. В. Беспалов, В. И. Беспалова, Д. В. Мельников // Теплоэнергетика. 2017. № 9. С. 64–70. <https://doi.org/10.1134/s0040601517090026>.
8. Беспалов, В. В. Технология осушения дымовых газов ТЭС с использованием теплоты конденсации водяных паров / В. В. Беспалов // Известия ТПУ. 2010. Т. 316, № 4. С. 56–59.

9. Овсянник, А. В. Моделирование процессов теплообмена при кипении жидкостей / А. В. Овсянник. Гомель: ГГТУ имени П. О. Сухого, 2012. 284 с.
10. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. М.: Энергия, 1973, 295 с.

Поступила 31.05.2018 Подписана в печать 25.09.2018 Опубликована онлайн 30.01.2019

REFERENCES

1. Klimenko A. V., Agababov V. S., Borisova P. N. (2017) On the Possibility of Generation of Cold and Additional Electric Energy at Thermal Power Stations. *Thermal Engineering*, 64 (6), 422–428. <https://doi.org/10.1134/s0040601517060015>.
2. Advantages of CO₂ Use in Refrigeration Technology (Based on JARN Materials). *Kholodilnaya Tekhnika*, 2016, (3), 25 (in Russian).
3. Modern Alternative Refrigerants for a Long-Term Perspective and their Possible Applications (Based on JARN Materials). *Kholodilnaya Tekhnika*, 2016, (6), 4–9 (in Russian).
4. Agababov V. S. (2001) On the Use of Expander-Generator Aggregates in the Gas Industry. *Energoberezhenie i Energoberegayushchie Tekhnologii v Energetike Gazovoi Promyshlennosti: Materialy Nauch.-Tekhn. Soveta OAO "Gazprom". T. 2* [Energy Conservation and Energy-Saving Technologies in the Power Engineering of the Gas Industry: Materials of the Scientific and Technical Council of JSC "Gazprom". Vol. 2]. Moscow, Publishing and Editorial Center "Gazprom", 50–53 (in Russian).
5. Agababov V. S. (2009) Nonfuel Plants for the Production of Electricity, Heat and Cold on the Basis of Expander-Generator Devices. *Novosti Teplosnabzheniya* [News of Heat Supply], (1), 48–50 (in Russian).
6. Agababov V. S., Baidakova Yu. O., Klimenko A. V., Smirnova U. I., Taktashev R. N. (2016) *Nonfuel Plant for the Centralized Combined Electric and Cold Supply*. Patent No 158931 of the Russian Federation (in Russian).
7. Bespalov V. V., Bespalova V. I., Melnikov D. V. (2017) Investigation and Optimization of the Depth of Utilization of Flue Gas Heat Recovery in Surface Heat Exchangers. *Thermal Engineering*, (9), 680–685. <https://doi.org/10.1134/s0040601517090026>.
8. Bespalov V. V. (2010) Technology of Dehumidification of Thermal Power Plant Flue Gases with the Use of the Heat of Condensation of Water Vapor. *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta* = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 316 (4), 56–59 (in Russian).
9. Ovsyannik A. V. (2012) *Modeling of Heat Transfer Processes when Liquids Are Being Boiled*. Gomel, Sukhoi State Technical University of Gomel. 284 (in Russian).
10. Brodyanskii V. M. (1973) *Exergetic Method of Thermodynamic Analysis*. Moscow, Energia Publ. 295 (in Russian).

Received: 31 May 2018

Accepted: 25 September 2018

Published online: 30 January 2019

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-88-100>

УДК 338.45

Повышение эффективности планирования как основа управления инвестиционной деятельностью промышленного предприятия

Е. Л. Чазов¹⁾, В. П. Грахов¹⁾, В. В. Криворотов²⁾, О. Л. Симченко¹⁾

¹⁾Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
(Ижевск, Российская Федерация),

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Первой и одной из важнейших функций управления является планирование. При этом в современных рыночных условиях время для реализации данного этапа весьма ограничено. Во многом это относится и к нефтегазовой промышленности. Ввиду сокращения ресурсной базы отрасли доля сверхприбыльных проектов значительно уменьшилась. Добыча трудноизвлекаемых запасов нефти и газа связана с активной инвестиционной деятельностью, необходимостью внедрения дорогостоящих технологий и оборудования. Рассмотрим наиболее распространенный вид инвестиционного проекта, связанного с проведением геолого-технических мероприятий. Для повышения экономической эффективности от проведения геолого-технических мероприятий предлагается реализовать автоматизированную модель на стадии планирования. Данная модель на основе обобщенных геологических, технологических, статистических, макроэкономических и экономических показателей позволяет оперативно решить следующие задачи: более точно и оперативно планировать затраты на проведение геолого-технических мероприятий; определить минимально допустимый рентабельный уровень дебита нефти после проведения геолого-технических мероприятий; определить максимально экономически обоснованную продолжительность капитального ремонта скважины; упорядочить проекты геолого-технических мероприятий по их привлекательности. По итогам реализации автоматизированной модели составлена матрица эффективности для конкретного месторождения, определяющая влияния необходимых инвестиций и планового дебита на экономические показатели проекта. Применение данной матрицы позволило исключить из плана несколько неэффективных геолого-технических мероприятий. Разработана методика ранжирования на базе расчета интегрированного коэффициента эффективности. На ее основе решен вопрос принятия оптимальных управленческих решений с учетом оценки влияния риска в случае рассмотрения проектов с одинаковой экономической эффективностью.

Ключевые слова: планирование, оценка проектов, учет риска, инвестиции, ранжирование проектов, методы оценки, оптимальное решение

Для цитирования: Повышение эффективности планирования как основа управления инвестиционной деятельностью промышленного предприятия / Е. Л. Чазов [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 1. С. 88–100. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-88-100>

Адрес для переписки

Грахов Валерий Павлович
Ижевский государственный технический
университет имени М. Т. Калашникова
ул. Студенческая, 7
426060, г. Ижевск, Российская Федерация
Тел.: +8 912 443-64-94
pgs@istu.ru

Address for correspondence

Grakhov Valery P.
Kalashnikov Izhevsk State
Technical University
7 Studencheskaya str.,
426060, Izhevsk, Russian Federation
Tel.: +8 912 443-64-94
pgs@istu.ru

Improving the Efficiency of Planning as a Basis for Management the Investment Activity of an Industrial Enterprise

E. L. Chazov¹⁾, V. P. Grakhov¹⁾, V. V. Krivorotov²⁾, O. L. Simchenko¹⁾

¹⁾Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation),

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

Abstract. The first and one of the most important functions of management is planning. At the same time, in the current market conditions, the time for the implementation of this stage is very limited. In many ways, this applies to the oil and gas industry all the same. Due to the reduction of the resource base of the industry, the share of super-profitable projects has decreased significantly. Extraction of hard-to-recover oil and gas reserves is associated with active investment activities and with the need to introduce expensive technologies and equipment. The most common type of investment project associated with the geological and technical activities is being considered in the present paper. In order to increase the economic efficiency of the geological and technical activities it is proposed to implement an automated model at the stage of planning. This model, on the basis of the generalized geological, technological, statistical, macroeconomic and economic indicators, allows to solve quickly the following problems: of more precise and prompt planning the expenses on carrying out geological and technical actions; of defining minimum admissible profitable level of an oil flow rate after carrying out geological and technical actions; of determining the most economically justified duration of the overhaul of the well; of organizing the projects of geological and technical measures according to their attractiveness. As a result of the implementation of the automated model, an efficiency matrix for a particular field was compiled that determines the impact of the necessary investments and planned flow rate on the economic indicators of the project. The use of this matrix made it possible to exclude several inefficient geological and technical measures from the plan. The method of ranking based on the calculation of the integrated efficiency coefficient has been developed. On its basis, the issue of making optimal management decisions taking into account the impact of risk assessment in the case of projects with the same economic efficiency is solved.

Keywords: planning, project evaluation, risk management, investment, project ranking, evaluation methods, optimal solution

For citation: Chazov E. L., Grakhov V. P., Krivorotov V. V., Simchenko O. L. (2019) Improving the Efficiency of Planning as a Basis for Management the Investment Activity of an Industrial Enterprise. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (1), 88–100. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-88-100> (in Russian)

Введение

Современное состояние нефтегазодобывающей отрасли характеризуется ухудшением качества промышленных запасов нефти из-за перехода большинства крупных месторождений на позднюю стадию разработки и открытия новых трудноизвлекаемых запасов, ввод которых в разработку требует больших капитальных вложений [1]. Основные вложения связаны с проведением геолого-технических мероприятий (ГТМ). В настоящее время в ОАО «Удмуртнефть» существует процедура формирования и утверждения месячной программы ГТМ. Подбор скважин-кандидатов для проведения ГТМ осуществляется на уровне производственных служб общества. Ввиду дефицита базы ГТМ время от подбора скважины-кандидата до выполнения на ней запланированных мероприятий не позволяет

провести тщательную предварительную оценку экономической эффективности. В связи с чем часть ГТМ оказываются экономически неэффективными или малоэффективными даже в случае достижения геолого-технологических параметров.

Цель исследований – разработка автоматизированной модели экономической оценки эффективности ГТМ на стадии планирования и подбора скважин-кандидатов, что в свою очередь позволит [2–4]:

- оперативно оценивать экономическую эффективность скважин-кандидатов при подборе ГТМ без необходимости проведения сложных и трудоемких расчетов;
- своевременно принимать решения о замене неэффективных ГТМ;
- достигать эффективности планируемых ГТМ не ниже уровня бизнес-плана;
- повысить эффективность планирования ГТМ;
- рассчитать матрицу эффективности для конкретного месторождения;
- упорядочить проекты ГТМ по их привлекательности;
- существенно снизить риск реализации неэффективного проекта ГТМ.

Применяемая в настоящее время в ОАО «Удмуртнефть» методика расчета экономической эффективности ГТМ на этапе планирования имеет ряд недостатков, в связи с чем уже только на стадии выполнения мероприятия принимаются решения о его замене. В результате возникают непроизводительные затраты, связанные с заменой неэффективного ГТМ.

Решение проблемы основано на включении в экономические расчеты модели таких факторов, как детализация проводимых мероприятий, адресный учет затрат в связи с определением межремонтного периода (МРП) скважины, способа эксплуатации, перечня внедряемого оборудования и дополнительных функций, необходимых специалистам производственных подразделений для повышения эффективности планирования мероприятий в автоматизированном формате.

Существующая методика расчета экономической эффективности геолого-технических мероприятий

Данная экономическая модель используется специалистами ОАО «Удмуртнефть» для расчета экономической эффективности планируемых ГТМ и составления отчетной документации согласно имеющимся стандартам [5]. Она включает расчеты:

1) добычи нефти на период длительности действия экономического эффекта от планируемых мероприятий

$$Q_n = \frac{q_{нГ_{пад}} D_{д.отр}}{100}, \quad (1)$$

где $q_{нГ_{пад}}$ – дополнительный дебит нефти по темпу падения; $D_{д.отр}$ – отработанные скважино-дни;

2) количества отработанных скважино-дней

$$D_{\text{д.отр}} = D_{\text{ср}} K_{\text{эксп}}, \quad (2)$$

где $D_{\text{ср}}$ – среднее количество дней в месяце; $K_{\text{эксп}}$ – коэффициент эксплуатации скважин;

3) расчета коэффициента эксплуатации

$$K_{\text{эксп}} = D_{\text{кал}} - D_{\text{рем}} - D_{\text{внр}} - D_{\text{всп}} - D_{\text{проч}}, \quad (3)$$

где $D_{\text{кал}}$ – календарные дни; $D_{\text{рем}}$ – продолжительность последующих ремонтов (дни); $D_{\text{внр}}$ – продолжительность вывода на режим; $D_{\text{всп}}$ – внутрисменные простои (за месяц); $D_{\text{проч}}$ – прочие (отказ трубопроводов, отключение электроэнергии и т. д.).

4) дополнительного дебита нефти с учетом темпа падения [6]

$$q_{\text{н}T_{\text{пад}}} = q_{\text{н}} (1 - T_{\text{пад}})^{1/12}, \quad (4)$$

где $T_{\text{пад}}$ – годовой темп падения; $q_{\text{н}}$ – дополнительный дебит нефти;

5) потока наличности

$$FV = B_{\text{н}} - Z_{\text{рем}} - K - Z_{\text{пер}} - Z_{\text{сод.скв}} - H_{\text{ндпи}} - H_{\text{им}} - H_{\text{пр}}, \quad (5)$$

где $B_{\text{н}}$ – выручка от реализации нефти (доход); $Z_{\text{рем}}$ – расходы на ремонт скважин (ОРЕХ); K – капитальные вложения (САРЕХ); $Z_{\text{пер}}$ – переменные расходы; $Z_{\text{сод.скв}}$ – затраты на содержание скважин; $H_{\text{ндпи}}$ – налог на добычу полезных ископаемых; $H_{\text{им}}$ – налог на имущество; $H_{\text{пр}}$ – налог на прибыль.

6) дисконтированного потока наличности

$$PV = \frac{FV}{(1+i)^n}, \quad (6)$$

где i – ставка дисконтирования; n – число периодов;

7) накопленного дисконтированного потока наличности

$$NPV = PV_1 + PV_2 + PV_3 + \dots + PV_n, \quad (7)$$

где PV_1, PV_2, PV_3 – дисконтированный поток наличности за первый, второй и третий периоды; PV_n – дисконтированный поток наличности за период n ; n – порядковое значение периода в расчете.

Предлагаемая методика расчета экономической эффективности геолого-технических мероприятий

В основе расчета дисконтированного потока лежат те же макроэкономические показатели, что и в существующей методике, но внесены представленные ниже изменения.

1. Детализирован перечень мероприятий.

Помимо основных мероприятий, в модели представлены детализированные виды мероприятий, характерных для условий ОАО «Удмуртнефть» (табл. 1).

Таблица 1

Детализированный перечень мероприятий
Detailed list of events

Вид мероприятия	Детализированное мероприятие	
Переход на другой горизонт (ПДГ)	Переход на вышележащий горизонт (ПВГ)	Переход на нижележащий горизонт (ПНГ)
Гидроразрыв пласта (ГРП)	ГРП с отсыпкой забоя	ГРП с двухпакерным оборудованием
Ввод из бездействия скважин (ВБС)	ВБС за счет перехода на другой горизонт	ВБС за счет проведения РИР
Ремонтно-изоляционные работы (РИР)	РИР двухпакерным оборудованием	РИР с установкой цементного моста
Ликвидация аварий (ЛА)	ЛА с глубинно-насосным оборудованием	ЛА с элементами эксплуатационной колонны
Приобщение объектов (ПО)	ПО с внедрением пакера-отсекателя	ПО без внедрения пакера-отсекателя

2. Произведен учет продолжительности МРП.

Данный показатель предполагает планирование дополнительных затрат, связанных с проведением текущего ремонта скважины (ТРС).

3. Произведен учет способа эксплуатации скважины.

Данный показатель предполагает планирование дополнительных затрат, связанных с выбором вида способа эксплуатации.

В ОАО «Удмуртнефть» скважины эксплуатируются двумя способами:

- механизированным с помощью привода станком-качалкой;
- механизированным с помощью электроцентробежного насоса.

4. Произведен учет затрат на оборудование и инфраструктуру.

Данный показатель предполагает планирование дополнительных затрат, связанных с необходимостью строительства линий электропередачи, реконструкцией нефтепровода, заменой силового трансформатора и проч.

Выбор дополнительных параметров производится пользователями в списке активного окна программы (рис. 1).

5. Дополнительные функции.

5.1. Подбор минимально допустимого дебита нефти и жидкости для проведения ГТМ.

Данная функция позволяет оперативно рассмотреть возможность проведения дополнительных мероприятий по конкретным скважинам с учетом показателей экономической эффективности и тем самым корректно определить рейтинг скважины.

Для использования этой функции пользователь активирует кнопку «Подбор дебита нефти». Вычисления выбора (подбора) значения дебита нефти и жидкости программой производятся автоматически.

Исходные данные по скважине		
ОГ	ОАО «Удмуртнефть»	
Месторождение	Киенгопское	
Дата начала ремонта	01.11.2018	
Скважина	623	
Вид ремонта	ГРП	
Способ эксплуатации	ЭЦН	
Состояние по фонду	<input checked="" type="checkbox"/> ДФ <input type="checkbox"/> БФ	
Исходные геологические данные		
Запускной дебит нефти	т/сут	5,0
Остановочный дебит нефти	т/сут	1,0
Запускной дебит жидкости	т/сут	38,0
Остановочный дебит жидкости	т/сут	11,0
Дни остановки на ГТМ	сут	10
Инвестиции в ГТМ		
Затраты на мероприятие	тыс. руб.	1720,00
ОНВСС	тыс. руб.	1500,00
Инфраструктура	тыс. руб.	0
Последующая замена оборудования		
Стоимость 1 ТРС	тыс. руб.	365,00
Стоимость оборудования	тыс. руб.	480,90
МРП	сут	734

Рис. 1. Исходные данные для расчета экономической эффективности

Fig. 1. Initial data for the calculation of economic efficiency

В качестве примера рассмотрим итоги расчета по планированию ПВЛГ (перевод на вышележащие горизонты) скважины № 151 Киенгопского месторождения (табл. 2, 3).

Таблица 2

Расчет фактической экономической эффективности
Calculation of actual economic efficiency

Вид ГТМ	Место-рождение	№ скважины	$q_{н}$, т/сут	$q_{ж}$, т/сут	Продолжительность ремонта	ОРЕХ, тыс. руб.	САРЕХ, тыс. руб.	NPV, тыс. руб.
ПВЛГ	Киенгопское	151	5,0	146	15	1161,6	3839,7	-2117,1

Согласно табл. 2, накопленный дисконтированный доход (NPV) – отрицательный (–2117,1 тыс. руб.). Потенциально возможная прибыль равна нулю, соответственно рейтинг скважины на проведение ГТМ снижается.

Таблица 3

Расчет экономически минимально допустимого дебита нефти
The calculation of the cost-minimum oil production rate

Вид ГТМ	Месторождение	№ скважины	q_n , т/сут	$q_{ж}$, т/сут	Продолжительность ремонта	OPEX, тыс. руб.	CAPEX, тыс. руб.	NPV, тыс. руб.
ПВЛГ	Киенгопское	151	6,2	181	15	1161,6	3839,7	266,9

По результатам подбора минимально допустимый по показателям рентабельности дебит нефти 6,2 т/сут при общем дебите жидкости 181 т/сут. Дисконтированный поток наличности при прочих равных условиях (OPEX, CAPEX) составит 266,9 тыс. руб. В этом случае пользователи рассматривают возможность проведения дополнительных мероприятий для достижения подобранных программой дебитов нефти и жидкости.

5.2. Подбор максимально допустимой продолжительности капитального ремонта скважин при проведении ГТМ.

При планировании капитального ремонта скважин при ликвидации сложных аварий данная функция позволяет оперативно рассмотреть возможность проведения дополнительных работ с учетом показателей экономической эффективности и тем самым корректно определить рейтинг скважины.

5.3. Расчет матрицы эффективности для конкретного месторождения.

Для оперативного управления эффективностью ГТМ на этапе подбора скважин-кандидатов рекомендуется использовать предельный рентабельный дебит с учетом стоимости инвестиций в ГТМ [7]. Матрица эффективности позволяет быстро определить потенциально рискованные скважины для реализации ГТМ: для ГТМ стоимостью 3400 тыс. руб. прирост дебита должен быть не менее 3 т/сут для конкретного месторождения (рис. 2).

Матрица эффективности (анализ влияния суммарных инвестиций и прироста дебита на PI)

Суммарные инвестиции	тыс.руб. %	Прирост дебита нефти, т/сут															
		1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	
1700	50%	1,01	1,60	2,19	2,78	3,37	3,96	4,54	5,14	5,72	6,32	6,91	7,50	8,09	8,68	9,27	
2040	60%	0,89	1,38	1,87	2,36	2,86	3,35	3,84	4,33	4,82	5,32	5,81	6,30	6,79	7,28	7,77	
2380	70%	0,80	1,22	1,64	2,07	2,49	2,91	3,33	3,75	4,17	4,60	5,02	5,44	5,86	6,28	6,70	
2720	80%	0,74	1,11	1,48	1,85	2,22	2,58	2,95	3,32	3,69	4,06	4,43	4,80	5,17	5,53	5,90	
3060	90%	0,69	1,02	1,34	1,67	2,00	2,33	2,66	2,98	3,31	3,64	3,97	4,30	4,63	4,95	5,28	
3400	100%	0,65	0,95	1,24	1,53	1,83	2,13	2,42	2,72	3,01	3,31	3,60	3,90	4,19	4,48	4,78	
3740	110%	0,62	0,89	1,15	1,42	1,69	1,96	2,23	2,50	2,76	3,03	3,30	3,57	3,84	4,10	4,37	
4080	120%	0,59	0,84	1,08	1,33	1,57	1,82	2,06	2,31	2,56	2,81	3,05	3,30	3,54	3,79	4,03	
4420	130%	0,57	0,79	1,02	1,25	1,48	1,70	1,93	2,16	2,38	2,61	2,84	3,06	3,29	3,52	3,74	
4760	140%	0,55	0,76	0,97	1,18	1,39	1,60	1,81	2,02	2,23	2,45	2,66	2,87	3,08	3,29	3,50	
5100	150%	0,53	0,73	0,92	1,12	1,32	1,51	1,71	1,91	2,10	2,30	2,49	2,69	2,89	3,09	3,29	
5440	160%	0,52	0,70	0,88	1,07	1,25	1,44	1,62	1,81	1,99	2,18	2,36	2,54	2,73	2,91	3,10	
5780	170%	0,50	0,68	0,85	1,02	1,20	1,37	1,54	1,72	1,89	2,07	2,24	2,41	2,59	2,76	2,93	
6120	180%	0,49	0,66	0,82	0,99	1,15	1,31	1,47	1,64	1,80	1,97	2,13	2,29	2,46	2,62	2,79	
6460	190%	0,48	0,64	0,79	0,95	1,10	1,26	1,41	1,57	1,72	1,88	2,04	2,19	2,35	2,50	2,65	
0,90	PI<1	1,10	1,5	2,00	PI> 1,5												

Рис. 2. Матрица эффективности для конкретного месторождения

Fig. 2. Performance matrix for a specific field

5.4. Расчет основных интегральных показателей эффективности.

По модели, используемой в ОАО «Удмуртнефть», вычисляется только один интегральный показатель – NPV.

Автоматизированная модель дополнительно позволяет рассчитывать:

- срок окупаемости (DPP);
- внутреннюю норму доходности (IRR);
- коэффициент рентабельности (PI).

Соответственно результаты расчетов по второй модели более точно отражают экономическую эффективность планируемых мероприятий (рис. 3).

Макроэкономические показатели	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Курс USD руб/\$	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66
Цена нефти Brent \$/барр	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
Netback - нефть \$/т	222,5	245,0	241,6	241,6	241,6	241,6	241,6	241,6	241,6	241,6	241,6
Коэффициент НДС	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
НДС - нефть \$/т	116,2	133,8	133,8	133,8	133,8	133,8	132,9	131,9	130,9	129,9	129,0
Ставка дисконтирования	20%										
Ставка налога на имущество	2,2%										
Ставка налога на прибыль	20%										
Экономические показатели	предельно-допустимые										
Суммарные инвестиции млн.руб.	3,22										
NPV млн.руб.	-4,1										
PI	-0,39	1,5									
IRR, год	-	20%									
DPP лет	не окупается										
Расчетный период	50	60									
Доп. добыча т	187	187	187	187	187	187	-	-	-	-	-
Решение о проведении работ на скважине:	Предельный прирост дебита нефти, т/сут 2,00										
Не рекомендуется к реализации											

Рис. 3. Расчет показателей экономической эффективности на автоматизированной модели

Fig. 3. Calculation of economic efficiency indicators with the use of the automated model

5.5. Ранжирование проектов ГТМ.

Одним из важнейших этапов при принятии управленческих решений является их ранжирование на основе множества технико-экономических показателей. Принятие важных инвестиционных решений не должно основываться только на одном или двух экономических показателях, например, чистого дисконтированного дохода (NPV) и прибыльности проекта (PI). Рассмотрим методику оценки экономической эффективности проекта с помощью сведения множества его технико-экономических показателей к однокритериальной задаче.

Основные показатели инвестиционного проекта следующие: срок окупаемости (PP); накопленный дисконтированный доход (NPV); внутренняя норма рентабельности (IRR); капитальные вложения, необходимые для инвестирования (K).

Дополнительные показатели – коэффициенты устойчивости (эластичности) накопленного дисконтированного дохода и внутренней нормы рентабельности по основным параметрам. В нефтяной промышленности вы-

деляются следующие параметры: цена нефти или газа (P); уровень добычи нефти (Q); капитальные вложения (K).

Соответственно коэффициенты устойчивости: NPV от P (NP); NPV от Q (NQ); NPV от K (NK); IRR от P (IP); IRR от Q (IQ); IRR от K (IK).

В итоге принятие управленческого решения инвестиционного характера с несколькими технико-экономическими показателями сводится к однокритериальной задаче.

Сравнение каждого варианта управленческого решения представляется на основе 10 показателей (векторов)

$$X_S = (NPV, IRR, K, PP, NQ, NP, NK, IQ, IP, IK),$$

где $S = 1, \dots, N$; S, N – номер и число вариантов проекта.

Для выбора оптимального построения расчетов перейдем к безвременным показателям и получим вектор приведенных параметров

$$X_S = (A_{S1}, A_{S2}, A_{S3}, A_{S4}, A_{S5}, A_{S6}, A_{S7}, A_{S8}, A_{S9}, A_{S10}).$$

Данный вектор на основе приведенных показателей определяется по формулам:

$$\begin{aligned} A_{S1} &= NPV_S / NPV_{\max}; \\ A_{S2} &= IRR_S / IRR_{\max}; \\ A_{S3} &= K_{\min} / K_S; \\ A_{S4} &= PP_{\min} / PP_S; \\ A_{S5} &= NQ_{\min} / NQ_S; \\ A_{S6} &= NP_{\min} / NP_S; \\ A_{S7} &= NK_{\min} / NK_S; \\ A_{S8} &= IQ_{\min} / IQ_S; \\ A_{S9} &= IP_{\min} / IP_S; \\ A_{S10} &= IK_{\min} / IK_S, \end{aligned}$$

где максимальные и минимальные значения показателей вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} NPV_{\max} &= \max NPV_S; \\ IRR_{\max} &= \max IRR_S; \\ K_{\min} &= \min K_S; \\ PP_{\min} &= \min PP_S; \\ NQ_{\min} &= \min NQ_S; \\ NP_{\min} &= \min NP_S; \\ NK_{\min} &= \min NK_S; \\ IQ_{\min} &= \min IQ_S; \\ IP_{\min} &= \min IP_S; \\ IK_{\min} &= \min IK_S, \end{aligned}$$

где $S = 1, \dots, N$.

При этом показатели A_{Sj} удовлетворяют неравенствам $0 < A_{Sj} \leq 1$; $S = 1, \dots, N$; $j = 1, \dots, 10$.

Соответственно самый оптимальный вариант определяется условием $A_{Sj} \rightarrow \max$.

Согласно [8], функция принадлежности представляет собой некоторую систему ограничений:

$$X_{Sj}(A_{Sj}) = \begin{cases} 0, & \text{если } A_{Sj} \leq B_{Sj}; \\ \sin^2(\pi(A_{Sj} - B_{Sj})/2(C_{Sj} - B_{Sj})), & \text{если } B_{Sj} < A_{Sj} \leq C_{Sj}; \\ 1, & \text{если } A_{Sj} \leq C_{Sj}, \end{cases} \quad (8)$$

где B_{Sj} , C_{Sj} – нижняя и верхняя границы допустимого значения параметра; $S = 1, \dots, N; j = 1, \dots, 10$.

При отсутствии иных предпочтений за B_{Sj} и C_{Sj} можно принять соответственно минимальное и максимальное значения параметра.

Обобщенный критерий

$$F(X_S) = \sqrt[M]{F1^{n1}(A_{S1}) \cdot F2^{n2}(A_{S2}) \times \dots \times F9^{n9}(A_{S9}) \cdot F10^{n10}(A_{S10})}. \quad (9)$$

Обобщенный критерий $F(X_S)$ принимает значение из следующего отрезка $(0, \dots, 1)$, где $S = 1, \dots, N; M = j$ [8].

Таким образом, все проекты определяются конкретным значением на базе обобщенного критерия $F(X_S)$. На их основе выбирают лучший из проектов для дальнейшей реализации.

Степень n_j определяет влияние параметра на функцию $F(X_S)$. Изменяя показатель степени, определяем возможные варианты расчета единого критерия. К примеру, IRR и NPV более важны, чем PP, следовательно, $n1$ и $n2$ должны быть больше, чем степень $n4$. Все эти показатели в любом случае должен установить экспертный аналитик. Изменяя степень n_j , можно ориентировать функцию однокритериальной оценки экономической эффективности проектов как на определение более прибыльных, так и на определение более надежных проектов [9–11].

Благодаря использованию данной модели была произведена оценка технико-экономической эффективности проектов ГТМ. В случае изменения макроэкономической ситуации (например, цены на нефть, курса доллара) определены рекомендации по обоснованной оптимизации капитальных вложений и эксплуатационных затрат при различных макроэкономических сценариях работы предприятия. По итогам оценки и исключения заведомо неэффективных ГТМ достигнут максимальный поток наличности. Разработанная методика оценки экономической эффективности позволяет не только определить лучший вариант, но и упорядочить инвестиционные проекты по привлекательности, что значительно снижает риски при принятии управленческих решений [12, 13].

Результаты рассмотренных методик оценки эффективности проектов ГТМ представлены в табл. 4.

Таблица 4

Ранжирование проектов

Project ranking

№ скважины	Ранжирование проектов		
	NPV, млн руб.	Значение расчетного коэффициента	Принятое решение
510610	9	0,91	1
510396	9	0,88	2
510646	9	0,75	3

В ходе рассмотрения одного из наиболее популярных видов инвестиционных проектов в ОАО «Удмуртнефть», активно применяемого на заключительной стадии разработки месторождений, установлено, что 9 из 82 запланированных мероприятий имеют отрицательный NPV (табл. 5).

Таблица 5

Список неэффективных мероприятий

List of ineffective measures

Вид мероприятия	Месторождение	№ скважины	Модель NPV, тыс. руб.		Отклонение, тыс. руб.
			существующая	предлагаемая	
ВБС РИР	Киенгопское	189	553	-364	-917
ВБС РИР	Киенгопское	50	618	-51	-669
ВБС РИР	Киенгопское	163	1195	-802	-1997
ПНГ	Гремихинское	237	1765	-151	-1916
ПНГ	Киенгопское	181	1765	-144	-1909
ПНГ	Чутырское	152	1765	-144	-1909
ПНГ	Карсовайское	44	1765	-153	-1918
ПНГ	Киенгопское	203	333	-1982	-2314
ПНГ	Чутырское	77	505	-2537	-3042
Итого			10265	-6326	-16591

Причины выявленных неэффективных мероприятий заключаются в следующем:

– продолжительность ремонта скважин была рассчитана на основании усредненных данных. По факту благодаря применению детализированного подхода к оценке продолжительности установлен существенный рост данного показателя;

– фактический МРП по данным скважинам не превышает среднего МРП по ОАО «Удмуртнефть». Соответственно не были учтены дополнительные затраты для проведения ТРС, внедрения оборудования; фактический коэффициент эксплуатации оказался ниже среднего показателя;

– для ряда скважин не были учтены затраты на обустройство выкидных линий, установки станка-качалки, планировку площадки для постановки бригады капитального ремонта скважины.

ВЫВОДЫ

1. Предлагаемая автоматизированная методика оценки эффективности геолого-технических мероприятий благодаря своим преимуществам, предусматривающим адресный и интегрированный подходы к оценке влияния геологических, технологических, статистических, макроэкономических и экономических показателей, позволяет оперативно уже на стадии планирования заменить неэффективные или высокорискованные мероприятия на более эффективные.

2. В рамках проведенной работы подготовлена матрица эффективности для конкретного месторождения, определяющая влияние необходимых инвестиций и планового дебита на экономические показатели проекта, а также предложена модель ранжирования на основе интегрированного коэффициента эффективности, позволяющего принять оптимальные управленческие решения при формировании и корректировке программы геолого-технических мероприятий с учетом рисков.

3. Автоматизированная модель может иметь практическое применение на любом нефтедобывающем предприятии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чазов, Е. Л. Анализ комплексных методов оценки экономической эффективности проектов развития промышленного предприятия / Е. Л. Чазов, В. П. Грахов, О. Л. Симченко // Методы, механизмы и факторы конкурентоспособности национальных экономических систем: материалы сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. Самара, 2018. С. 79–83.
2. Ильин, А. И. Планирование на предприятии / А. И. Ильин, Л. М. Сеница. Минск: Новое знание, 2000. 700 с.
3. Грахов, В. П. Методика определения эффективности внедрения системы внутрифирменного планирования / В. П. Грахов // Приоритеты социально-экономического развития регионов России в новых условиях: Всерос. науч.-практ. конф., 29–30 мая 2003 г.: сб. статей. Пенза, 2003. С. 128–131.
4. Анализ и систематизация основных подходов и методов оценки эффективности предприятия / О. Л. Симченко [и др.] // Вестник Челябинского государственного университета. 2018. Т. 417, № 7. С. 104–111.
5. Коробейников, Н. Ю. Особенности экономической оценки проведения геолого-технических мероприятий / Н. Ю. Коробейников, Г. Р. Терегулова // Нефтяное хозяйство. 2001. № 4. С. 13.
6. Оценка и планирование конкурентоспособности предприятий топливно-энергетического комплекса / В. В. Криворотов [и др.]. Екатеринбург: УрФУ, 2016. 178 с.
7. Грахов, В. П. Проблемы механизма формирования инвестиционной политики / В. П. Грахов, Ю. Г. Кислякова, О. Л. Чазова // Бизнес в законе. 2014. № 2. С. 71–73.
8. Чазов, Е. Л. Стратегическая модель оптимизации потока наличности, используемая при управлении эффективностью промышленного предприятия в условиях изменений факторов внешней среды / Е. Л. Чазов, В. П. Грахов, О. Л. Симченко // Фундаментальные исследования. 2018. № 8. С. 127–130.
9. Тарануха, Н. Л. Повышение эффективности предприятий на основе системного анализа проектных решений / Н. Л. Тарануха // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2004. № 2. С. 46–49.
10. Симченко, О. Л. Формирование методики оценки эффективности промышленных предприятий, функционирующих на территории индустриальных парков / О. Л. Симченко // Современная экономика: проблемы и решения. 2018. Т. 98, № 2. С. 50–60.
11. Старик, Д. Э. Расчеты эффективности инвестиционных проектов / Д. Э. Старик. М.: Финстатинформ, 2001. 131 с.

12. Идрисов, А. Б. Стратегическое планирование и анализ эффективности инвестиций / А. Б. Идрисов, С. В. Картышев, А. В. Постников. М.: Информационно-издательский дом «Филинь», 2006. 272 с.
13. Андреев, А. Ф. Оценка эффективности и планирование проектных решений в нефтегазовой промышленности / А. Ф. Андреев. М.: Нефть и газ, 1997. 276 с.

Поступила 24.10.2018 Подписана в печать 26.12.2018 Опубликована онлайн 30.01.2019

REFERENCES

1. Chazov E. L., Grakhov V. P., Simchenko O. L. (2018) Analysis of Comprehensive Methods for Assessing the Economic Efficiency of Industrial Enterprise Development Projects. *Metody, Mekhanizmy i Faktory Konkurentosposobnosti Natsional'nykh Ekonomicheskikh Sistem: Materialy Sb. St. Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf.* [Methods, Mechanisms and Factors of Competitiveness of National Economic Systems: Materials Collection of Articles of the International Scientific and Practical Conference]. Samara, 79–83 (in Russian).
2. Il'in A. I., Sinitsa L. M. (2000) *Enterprise Activity Planning*. Minsk, Novoe Znanie Publ. 700 (in Russian).
3. Grakhov V. P. (2003) Methods of Determining the Effectiveness of the Implementation of the System of Internal Planning of Activity of a Firm. *Prioritety Sotsial'no-Ekonomicheskogo Razvitiya Regionov Rossii v Novykh Usloviyakh: Vseros. Nauch.-Prakt. Konf., 29–30 Maya 2003 g.: Sb. St.* [Priorities of Social and Economic Development of Russian Regions in the New Conditions: Collection of Articles of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. Penza, 128–131 (in Russian).
4. Simchenko O. L., Grakhov V. P., Maksimov K. V., Chazov E. L. (2018) Analysis and Systematization of the Main Approaches and Methods for Assessing the Efficiency of an Enterprise. *Vestnik Chelyabinskogo Gosudarstvennogo Universiteta* = Bulletin of Chelyabinsk State University, 417 (7), 104–111 (in Russian).
5. Korobeinikov N. Yu., Teregulova G. R. (2001) Specific Features of Economic Evaluation of Geological and Technical Planned Activities. *Neftyanoye Khozyaystvo = Oil Industry*, (4), 13 (in Russian).
6. Krivorotov V. V., Korsunov P. P., Voronov D. S., Matveeva T. V. (2016) *Assessment and Planning of Competitiveness of Enterprises of Fuel and Energy Complex*. Ekaterinburg, Ural Federal University. 178 (in Russian)
7. Grakhov V. P., Kislyakova Yu. G., Chazova O. L. (2014) Problems of the Mechanism of Formation of Investment Policy. *Biznes v Zakone = Business in Law*, (2), 71–73 (in Russian).
8. Chazov E. L., Grakhov V. P., Simchenko O. L. (2018) Strategic Model of Cash Flow Optimization Used in the Management of Industrial Enterprise Efficiency in the Conditions of Changes in Environmental Factors. *Fundamental'nye Issledovaniya = Fundamental Research*, (8), 127–130 (in Russian).
9. Taranukha N. L. (2004) Improving the Efficiency of Enterprises on the Basis of System Analysis of Design Solutions. *Vestnik Izhevskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Bulletin of Kalashnikov ISTU*, (2), 46–49 (in Russian).
10. Simchenko O. L. (2018) Formation of Methods for Assessing the Effectiveness of Industrial Enterprises Operating in Industrial Parks. *Sovremennaya Ekonomika: Problemy i Resheniya* [Modern Economy: Problems and Solutions], 98 (2), 50–60 (in Russian).
11. Starik D. E. (2001) *Calculations of Efficiency of Investment Projects*. Moscow. Finstatinform Publ. 131 (in Russian).
12. Idrisov A. B., Kartyshev S. V., Postnikov A. V. (2006) *Strategic Planning and Investment Performance Analysis*. Moscow, Information Publishing House "Filin". 272 (in Russian).
13. Andreev A. F. (1997) *Efficiency Assessment and Planning of Design Solutions in the Oil and Gas Industry*. Moscow, Neft' and gaz Publ. 276 (in Russian).

Received: 24 October 2018 Accepted: 26 December 2018 Published online: 30 January 2019