

# 100 лет БНТУ

## 100<sup>th</sup> Anniversary of BNTU



**Уважаемые коллеги, дорогие друзья!**

10 декабря 2020 года Белорусскому национальному техническому университету исполняется 100 лет. Искренне поздравляю вас с этой знаменательной датой и благодарю всех ученых и специалистов за сотрудничество с нашей альма-матер. За годы становления и развития БНТУ достиг значительных успехов в научно-образовательной и производственно-инновационной деятельности, стал флагманом высшего технического образования Республики Беларусь, признан базовой организацией государств – участников Содружества Независимых Государств по высшему техническому образованию и входит в число лучших инженерно-технических университетов мира. БНТУ на протяжении многих лет занимает лидирующие позиции в мировых рейтингах, укрепляет международное сотрудничество. Уверен, что наше сотрудничество будет способствовать дальнейшему развитию научно-исследовательского и инженерно-технического образования не только в Республике Беларусь, но и во всем мире. Примите искренние поздравления с юбилеем Белорусского национального технического университета! Желаю всем здоровья, успехов и удачи во всех начинаниях!

*С уважением,  
ректор Белорусского национального  
технического университета  
С. Харитончик*

**Dear colleagues and friends!**

On December 10, 2020 the Belarusian National Technical University (BNTU) will celebrate its centenary. On the occasion of this significant date I wish you happy anniversary and express my gratitude to all scientists and specialists who cooperate with our alma mater. During the years of establishing and development BNTU has achieved significant success in scientific, educational, industrial and innovative activities; it has become the flagship of higher technical education of the Republic of Belarus. Our university is recognized as the basic organization of the Commonwealth of Independent States for higher technical education and it is one of the best engineering and technical universities in the world. For many years BNTU has been a leader in world rankings and it has also been strengthening international cooperation. I am confident that our collaboration will contribute to the further development of research and engineering education not only in the Republic of Belarus, but throughout the world. Please accept my sincere congratulations on the occasion of the centenary of the Belarusian National Technical University! I wish you all health, success and good luck in all your endeavors!

*Yours faithfully,  
S. Kharytonchyk,  
rector of the Belarusian National  
Technical University*

*С НОВЫМ ГОДОМ  
И РОЖДЕСТВОМ!*

---

*HAPPY NEW YEAR!  
MERRY CHRISTMAS!*

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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ  
**ЭНЕРГЕТИКА** Том 63, № 6  
2020

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

**Учредитель**

Министерство образования Республики Беларусь

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

*22 декабря – День энергетика*

**СОДЕРЖАНИЕ**

**ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА**

- Романюк Ф. А., Румянцев В. Ю., Румянцев Ю. В., Дерюгина Е. А., Климкович П. И.** Исследование блокировки токовой защиты электроустановок с трансформаторами ..... 491
- Бладыко Ю. В.** Механический расчет гибких токопроводов при наличии горизонтальных сосредоточенных нагрузок ..... 500
- Зализный Д. И.** Модель фотоэлектрического модуля для библиотеки SimPowerSystems пакета MatLab/Simulink ..... 515

**ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА**

- Ярмольчик Ю. П., Шрёгер Р., Хаберфельнер Х., Пихлер М., Костич Д., Мороз Г. В.** Комбинированное сжигание потоков различных промышленных отходов в топках котлов. Часть 2 ..... 526
- Фархадзаде Э. М., Мурадалиев А. З., Фарзалиев Ю. З., Ашурова У. К.** Внутренний бенчмаркинг тепловых электростанций электроэнергетических систем ..... 541
- Овсянник А. В., Ключинский В. П.** Термодинамический анализ озоно-безопасных низкокипящих рабочих тел для турбодетандерных установок ..... 554

**ГИДРОЭНЕРГЕТИКА**

- Веременик В. В., Ивашечкин В. В., Крицкая В. И.** Математические модели скважинных водозаборов с разветвленной и кольцевой схемами соединения сборных водоводов ..... 563
- Перечень статей, опубликованных в журнале «Энергетика» в 2020 г.**
- I. Тематический указатель** ..... 581
- II. Именной указатель** ..... 584

**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),*  
*К. В. ДОБРЕГО (Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь, 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),*  
*В. В. ИВАШЕЧКИН (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),*  
*А. С. КАЛИНИЧЕНКО (Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь),*  
*А. И. КИРИЛЛОВ (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация),*  
*А. КОННОВ (Университет Лунда, Швеция),*  
*Х. МАХКАМОВ (Университет Нортумбрии, Великобритания),*  
*А. А. МИХАЛЕВИЧ (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),*  
*НГО ТУАН КИЕТ (Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),*  
*О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),*  
*Е. Н. ПИСЬМЕННЫЙ (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),*  
*В. Ю. РУМЯНЦЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),*  
*А.-С. С. САУХАТАС (Рижский технический университет, Рига, Латвийская Республика),*  
*В. С. СЕВЕРЯНИН (Брестский государственный технический университет, Брест, Республика Беларусь),*  
*В. А. СЕДНИН (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),*  
*Б. С. СОРОКА (Институт газа НАН Украины, Киев, Украина),*  
*В. А. СТРОЕВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),*  
*Е. В. ТОРОПОВ (Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация),*  
*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)*

**Ведущий стилистический редактор В. Н. Гурьянчик**

**Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 28 февраля 2019 г. Регистрационный номер 1257**

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

---

Подписано к печати 30.11.2020. Формат бумаги 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага мелованная.  
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 11,50. Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз.  
Дата выхода в свет . 2020. Заказ .

---

Адрес редакции: 220013, г. Минск, Республика Беларусь, пр. Независимости, 65.  
Белорусский национальный технический университет, корп. 2, комн. 327.  
Тел.: +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, 2020

PROCEEDINGS OF THE CIS  
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS  
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

**ENERGETIKA**

V. 63, No 6  
2020

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL  
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

**Founder**

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

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

**CONTENTS**

**ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

|                                                                                                                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Dziaruhina A. A., Klimkovich P. I.</b> Researching the Blocking of Current Protection of Electrical Power Units with Transformers ..... | 491 |
| <b>Bladyko Y. V.</b> Mechanical Calculation of Flexible Wires in the Presence of Horizontal Concentrated Loads .....                                                                             | 500 |
| <b>Zalizny D. I.</b> Model of a Photovoltaic Module for the MatLab/Simulink SimPowerSystems Library .....                                                                                        | 515 |

**HEAT POWER ENGINEERING**

|                                                                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Yarmolchick Yu. P., Schröger R., Habermelner H., Pichler M., Kostić D., Moroz G. V.</b> Combined Combustion of Various Industrial Waste Flows in Boiler Furnaces. Part 2 ..... | 526 |
| <b>Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Farzaliyev Y. Z., Ashurova U. K.</b> Internal Benchmarking of Thermal Power Plants of Electric Power Systems .....                       | 541 |
| <b>Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P.</b> Thermodynamic Analysis of Ozone-Safe Low Boiling Working Media for Turbo-Expander Plants .....                                          | 554 |

**HYDRAULIC POWER ENGINEERING**

|                                                                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Veremenyuk V. V., Ivashechkin V. V., Krytskaya V. I.</b> The Borehole Water Intakes Mathematical Models with a Branched and Circular Connection Schemes for Prefabricated Water Conduits. .... | 563 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

**List of Papers Published in “Energetika” Journal, 2020**

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| <b>I. Thematic index.</b> .... | 581 |
| <b>II. Name index</b> .....    | 584 |

**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),*  
*K. V. DOBREGO (Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus, 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),*  
*V. V. IVASHECHKIN (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),*  
*A. S. KALINICHENKO (Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus),*  
*A. I. KIRILLOV (Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation),*  
*A. KONNOV (Lund University, Sweden),*  
*K. MAHKAMOV (Northumbria University, United Kingdom),*  
*A. A. MIKHALEVICH (The National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),*  
*NGO TUAN KIET (Research Energy Institute under the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),*  
*O. G. PENYAZKOV (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),*  
*E. N. PISMENNYI (National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine),*  
*V. Yu. RUMIANTSEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),*  
*A.-S. S. SAUHATAS (Riga Technical University, Riga, Republic of Latvia),*  
*V. S. SEVERYANIN (Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus),*  
*V. A. SEDNIN (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),*  
*B. S. SOROKA (The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine),*  
*V. A. STROEV (National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation),*  
*E. V. TOROPOV (South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation),*  
*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)*

**Leading Style Editor V. N. Guryanchyk**

**Publication is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus in 2019, February, 28<sup>th</sup>  
Reg. No 1257**

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

---

Passed for printing 30.11.2020. Dimension of paper 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Coated paper.  
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 11.50.  
An edition of 100 copies. Date of publishing 2020. 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, 2020

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-491-499>

УДК 621.316.925

## Исследование блокировки токовой защиты электроустановок с трансформаторами

Ф. А. Романюк<sup>1)</sup>, В. Ю. Румянцев<sup>1)</sup>, Ю. В. Румянцев<sup>1)</sup>, Е. А. Дерюгина<sup>1)</sup>,  
П. И. Климкович<sup>1)</sup>

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020  
Belarusian National Technical University, 2020

**Реферат.** В электроустановках с трансформаторами при включении их под напряжение без нагрузки и в ряде других режимов возникает бросок тока намагничивания (БТН), который может вызвать ложное срабатывание токовой защиты. Для исключения подобной ситуации осуществляется блокировка защиты. Принцип действия блокировки основывается на том, что в трехфазной системе в нормальном режиме и при симметричных коротких замыканиях (КЗ) содержащиеся в фазных токах электроустановки первые гармоники образуют прямую последовательность, а вторые – обратную. При возникновении несимметричного режима, в том числе несимметричного КЗ, появляется обратная последовательность, образованная входящими в состав фазных токов первыми гармониками. В режимах БТН в фазных токах присутствуют вторые гармоники значительной величины, которые создают обратную последовательность. При анализе информационных параметров токов указанных последовательностей производится идентификация режимов БТН и КЗ с осуществлением при необходимости блокировки защиты. Исследование ее функционирования проводилось методом вычислительного эксперимента путем анализа изменений вычисляемого параметра блокировки, сравниваемого с уставкой срабатывания, с использованием цифровой модели, реализованной в среде динамического моделирования MatLab-Simulink. В результате выполненных расчетов подтверждена принципиальная работоспособность предложенной блокировки, которая обеспечивает достаточно достоверную идентификацию режимов БТН и КЗ вне зависимости от степени насыщения трансформаторов тока. При этом установлено, что при более простой реализации данный принцип блокировки имеет более высокую чувствительность, чем классический, основанный на оценке отношения второй и первой гармоник токов фаз. В режимах КЗ в электроустановке предложенная блокировка вносит замедление в срабатывание токовой защиты, которое может быть уменьшено за счет повышения быстродействия цифровых частотных фильтров.

**Ключевые слова:** токовая защита, бросок тока намагничивания, блокировка, прямая и обратная последовательности, вычислительный эксперимент, модель, MatLab-Simulink, идентификация, параметр блокировки, чувствительность

**Для цитирования:** Исследование блокировки токовой защиты электроустановок с трансформаторами / Ф. А. Романюк [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 6. С. 491–499. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-491-499>

---

### 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](mailto: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](mailto:faromanuk@bntu.by)

---

## Researching the Blocking of Current Protection of Electrical Power Units with Transformers

F. A. Romaniuk<sup>1)</sup>, V. Yu. Rumiantsev<sup>1)</sup>, Yu. V. Rumiantsev<sup>1)</sup>, A. A. Dziaruhina<sup>1)</sup>, P. I. Klimkovich<sup>1)</sup>

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

**Abstract.** The magnetizing current inrush appears in electrical power units equipped with transformers in case of no-load energizing of the power transformers and in a number of other cases. This phenomenon could cause a false triggering of the current protection. To prevent incorrect actions of the current protection during the magnetizing current inrush a protection blocking is carrying out. The blocking principle operation is based on the fact that in a three-phase system in normal mode and in case of symmetrical short circuit the first harmonics contained in the phase currents of electrical installations form a direct sequence and the second ones – the negative sequences. In case of an asymmetric mode, including an asymmetric short circuit, the negative sequence appears, formed by the first harmonics that are part of the phase currents of the specified system. In magnetizing current inrush modes, second harmonics of significant magnitude are present in phase currents, which form the negative sequence. Based on the analysis of the information parameters of the specified sequences currents, identification of the magnetizing current inrush and short-circuit modes is performed with the implementation of the protection blocking if necessary. The study of the current protection blocking functioning was performed using computational experiment by analyzing the calculated changes of blocking parameter compared with the threshold setpoint. The specified researching is done by using the digital model that is implemented in the dynamic modeling environment MatLab-Simulink. As a result of the performed calculations, the principal operability of the proposed current protection blocking was confirmed that provides a fairly reliable identification of the magnetizing current inrush and short-circuits modes, regardless of the degree of saturation of current transformers. It was found that the proposed principle of the current protection blocking has a higher sensitivity in comparison with the classical one based on the estimation of the ratio of the second and first harmonics of the phase currents. In short-circuit modes in an electrical power units the proposed blocking causes a current protection operation delay that can be reduced by digital filters performance improvement.

**Keywords:** current protection, magnetizing current inrush, blocking, positive and negative sequences, computational experiment, model, MatLab-Simulink, identification, blocking parameter, sensitivity

**For citation:** Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Dziaruhina A. A., Klimkovich P. I. (2020) Researching the Blocking of Current Protection of Electrical Power Units with Transformers. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (6), 491–499. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-491-499> (in Russian)

### Введение

В электроустановках с трансформаторами при включении их под напряжение без нагрузки и в ряде других случаев изменения режима работы возникает бросок тока намагничивания [1]. Это способно вызвать ложное срабатывание токовой защиты электроустановки [2]. Исключить неправильные действия защиты можно путем ее загробления, что повлечет снижение чувствительности к коротким замыканиям, либо запретом действия на время существования БТН, которое является широко используемым практическим мероприятием [3].

Реализация блокировки, ориентированной на применение в цифровых токовых защитах электроустановок, подробно описана в [4, 5]. Принцип ее

действия основывается на том, что в трехфазной системе в нормальном режиме и при симметричных КЗ содержащиеся в фазных токах первые гармоники создают прямую последовательность, а вторые – обратную [6]. При возникновении несимметричного режима, в том числе несимметричного КЗ, появляется обратная последовательность, образованная содержащимися в токах фаз первыми гармониками. Для режимов БТН характерно возникновение обратной последовательности из-за наличия в фазных токах системы вторых гармоник значительной величины. Сравнивая информационные параметры токов указанных последовательностей, можно идентифицировать режимы БТН и КЗ, осуществляя при необходимости блокировку защиты.

### Основная часть

В исследуемой блокировке исполнительная команда вырабатывается при положительном результате сравнения вычисляемого параметра  $p_n$  с задаваемой уставкой срабатывания  $k_{\text{бл}}$ .

При этом параметр блокировки может определяться по одному из следующих выражений:

$$p_1 = \frac{I_{m22}}{I_{m11}}, \quad (1)$$

где  $I_{m22}$  – амплитуда тока второй гармоники обратной последовательности;  $I_{m11}$  – то же первой гармоники прямой последовательности;

$$p_2 = \frac{I_{m22}}{I_{m1\text{макс}}}, \quad (2)$$

$I_{m1\text{макс}}$  – наибольшее из значений амплитуд первых гармоник фазных токов;

$$p_3 = \frac{I_{m22}}{I_{m1\text{ср}}}, \quad (3)$$

$I_{m1\text{ср}}$  – среднее значение амплитуд первых гармоник фазных токов.

В основу оценки работоспособности и эффективности функционирования предложенной блокировки положен сравнительный анализ изменений  $p_1, p_2, p_3$  в режимах БТН и КЗ в электроустановке.

### Моделирование

Решение обозначенной задачи осуществлялось методом вычислительного эксперимента с использованием цифровой модели, реализованной в среде динамического моделирования MatLab-Simulink [7].

В структуру указанной модели входят энергосистема, линия электропередачи, трансформатор, трехфазная группа трансформаторов тока (ТТ), нагрузка, блоки включения и КЗ, а также модели цифровых частотных фильтров, фильтров прямой и обратной последовательностей и других

элементов, обеспечивающих получение параметров блокировки  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ . Моделирование цифровой структуры выполнено с применением подходов и методов, использовавшихся в [8, 9]. Разработанное математическое и информационное обеспечение вычислительного эксперимента как инструмент исследования позволяет проводить проверку и давать оценку поведению блокировки в следующих режимах:

- включения ненагруженного трансформатора под напряжение;
- восстановления уровня напряжения после отключения внешних КЗ различных видов;
- возникновения различных видов КЗ в электроустановке.

Для всех режимов предусмотрена возможность учета насыщения ТТ [10].

### Результаты исследования

С помощью разработанных программных средств исследовано поведение блокировки в перечисленных выше режимах работы электроустановки с трансформаторами ТДН-16000/110 и ТДН-6300/110. При этом расчеты показали, что характер изменения и текущие значения  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  для электроустановок с указанными трансформаторами практически идентичны, в связи с чем приводятся полученные результаты для электроустановки с трансформатором ТДН-16000/110.

На рис. 1 представлены первичные  $i_1$ , вторичные  $i_2$  токи (а), а также параметры блокировки  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  (б) при включении ненагруженного трансформатора под напряжение с фазой включения 0.

В данном режиме наблюдаются наибольшая амплитуда БТН и относительно большая постоянная времени затухания (рис. 1а). Параметры блокировки  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  имеют схожий характер изменения, но отличаются по уровню. В начальном периоде возникновения БТН отмечаются выбросы значений  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ . Это обусловлено использованием на указанном периоде информации о токах как предшествующего режима, так и режима включения, что порождает динамическую погрешность определения параметров блокировки. При этом выбросы  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  не будут приводить к несрабатыванию блокировки.

Как видно из рис. 1б, после выбросов  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  имеют место их выраженные минимумы, определяющие наименьшую чувствительность блокировки. Текущее значение коэффициента чувствительности, рассчитываемое как отношение параметра блокировки  $p_n$  к уставке срабатывания  $k_{\text{бл}}$ , при неизменной величине последней будет тем выше, чем больше  $p_n$ . Таким образом, наиболее высокую чувствительность имеет блокировка, основанная на использовании параметра  $p_1$ , вычисляемого по выражению (1). Тем не менее следует отметить, что блокировки с контролем параметров  $p_2$  или  $p_3$ , вычисляемых по (2), (3) соответственно, отличаются более простой реализацией.

Результаты исследования режима включения ненагруженного трансформатора под напряжение при других, отличающихся от нулевой, фазах показали, что характер изменения  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  близок к приведенным на рис. 1б зависимостям, а отклонения их численных значений не являются критичными.

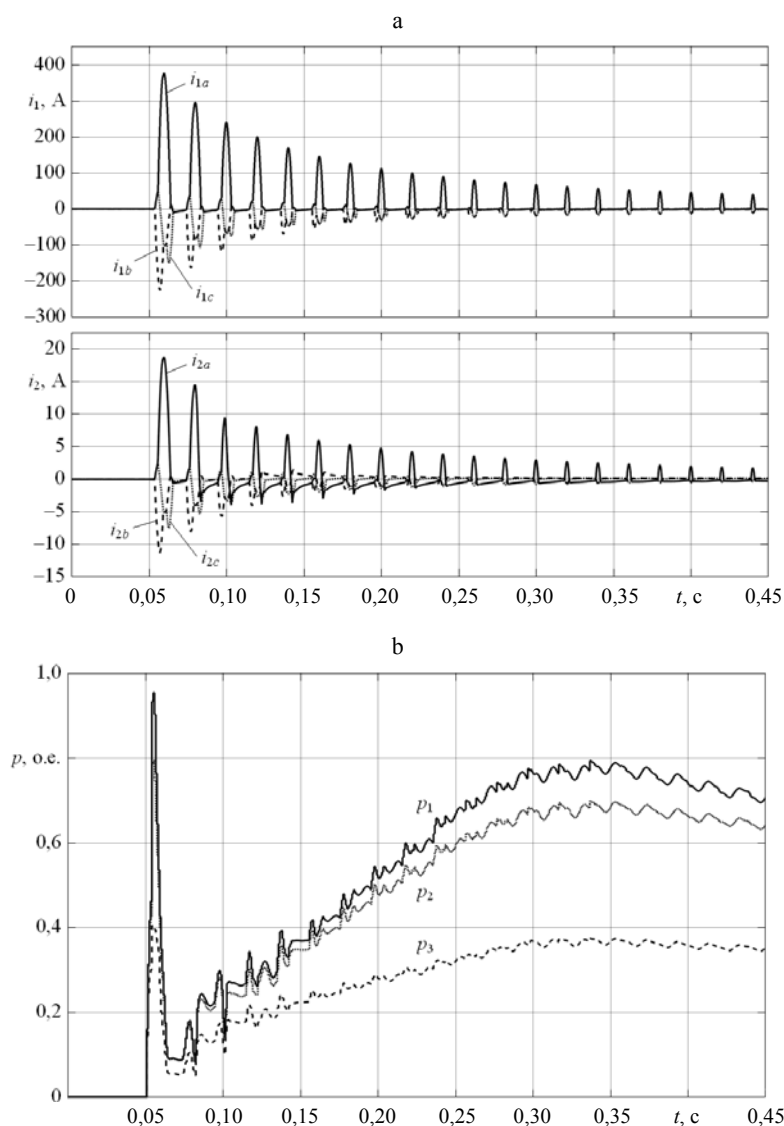


Рис. 1. Первичные  $i_1$ , вторичные  $i_2$  токи (а) и параметры блокировки (б) при включении ненагруженного трансформатора под напряжение

Fig. 1. Primary  $i_1$ , secondary  $i_2$  currents (a) and blocking parameters (b) in case of no-load energizing of the power transformers

Были проведены серии вычислительных экспериментов для режимов КЗ в электроустановке и восстановления напряжения после отключения внешних повреждений. Изучалось поведение блокировки при возникновении и отключении как симметричных, так и несимметричных КЗ при наличии и отсутствии в токах апериодических составляющих, а также с учетом степени насыщения ТТ. Результаты исследований для наиболее существенных с точки зрения функционирования блокировки режимов электроустановки приведены на рис. 2 и 3.

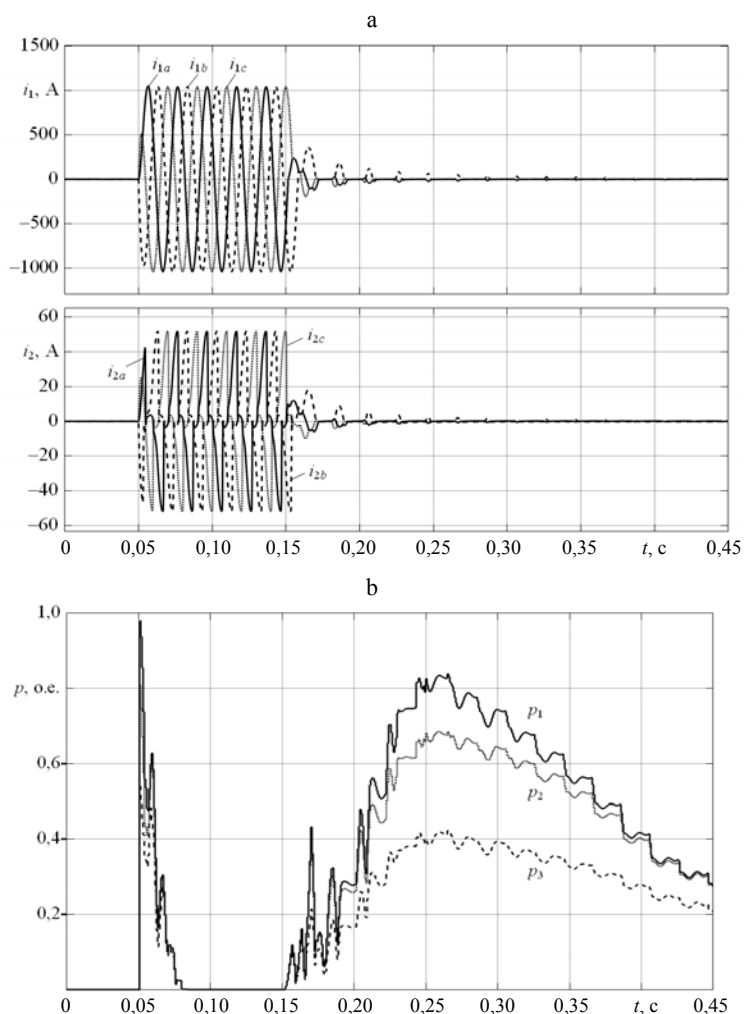


Рис. 2. Первичные  $i_1$ , вторичные  $i_2$  токи (а) и параметры блокировки (б) при симметричном коротком замыкании и после его отключения

Fig. 2. Primary  $i_1$ , secondary  $i_2$  currents (a) and blocking parameters (b) in case of symmetrical short circuit and after switching it off

При восстановлении напряжения после отключения внешних симметричных КЗ без апериодических составляющих в токах с вхождением ТТ в режим насыщения амплитуды первичного  $i_1$  и вторичного  $i_2$  БТН (рис. 2а) заметно меньше указанных амплитуд при включении ненагруженного трансформатора под напряжение (рис. 1а). Рассматриваемый режим сопровождается увеличением параметров блокировки  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  с последующим их снижением по мере затухания БТН (рис. 2б). Характер изменения и уровни  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  позволяют обеспечить действие блокировки.

Режим восстановления напряжения после отключения внешних несимметричных КЗ при наличии в токах апериодических составляющих (рис. 3а) и насыщении ТТ сопровождается более медленным нарастанием  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  (рис. 3б), но их уровни создают возможность для срабатывания блокировки в начальный период БТН.

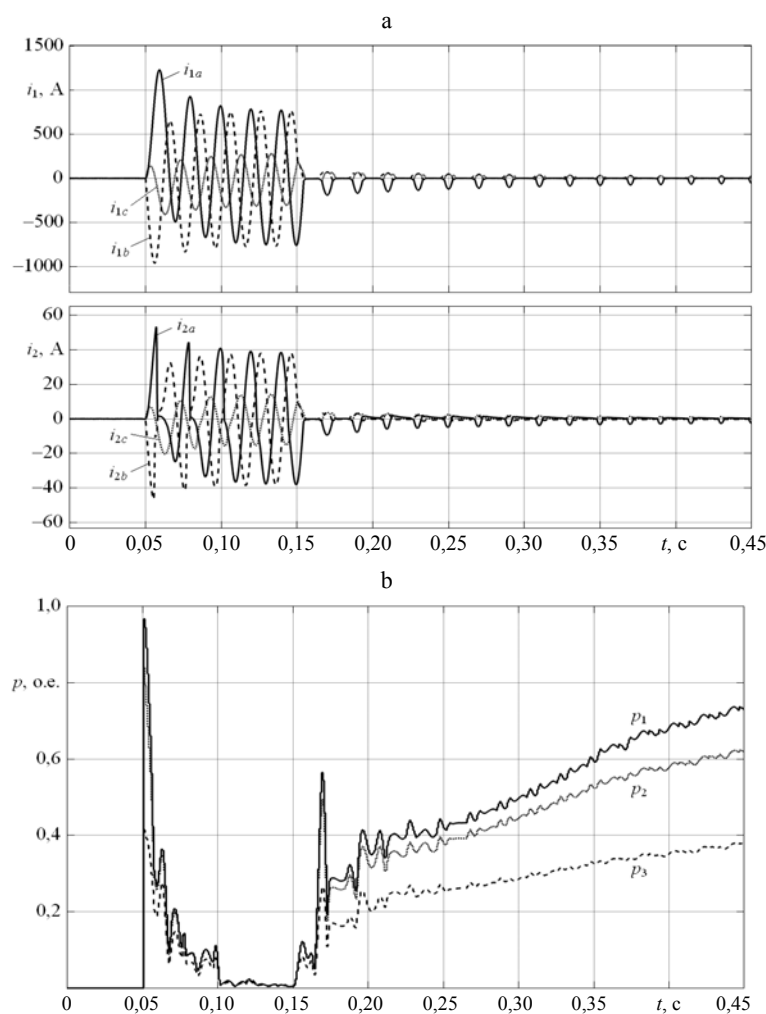


Рис. 3. Первичные  $i_1$ , вторичные  $i_2$  токи (а) и параметры блокировки (б) при несимметричном коротком замыкании и после его отключения  
 Fig. 3. Primary  $i_1$ , secondary  $i_2$  currents (a) and blocking parameters (b) in case of asymmetric short circuit and after switching it off

При КЗ всех видов в электроустановке с апериодическими составляющими в токах и без них независимо от степени насыщения ТТ параметры блокировки  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  спустя один-два периода промышленной частоты становятся равными нулю либо имеют несущественные значения (рис. 2, 3б). Последнее характерно для режимов КЗ с апериодическими составляющими в токах. В конечном итоге создаются условия для несрабатывания блокировки и обеспечивается возможность для действия защиты.

В начальный период КЗ всех видов в электроустановке имеют место выбросы параметров блокировки  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ , которые с течением времени снижаются до нулевых или несущественных значений (рис. 2, 3б). Этот процесс является более длительным при наличии в токах апериодических составляющих (рис. 3б). При работе электроустановки до КЗ в нагрузочном режиме указанные выбросы значительно меньше как по уровню, так и

по длительности. Отмеченное выше будет приводить к кратковременному срабатыванию блокировки и вносить замедление в действие защиты, составляющее один-два периода промышленной частоты. Подчеркнем, что применительно к токовой защите это не следует рассматривать как существенный недостаток.

Причина появления выбросов  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  в начальный период возникновения и отключения КЗ та же, что и при включении ненагруженного трансформатора под напряжение, о чем упоминалось ранее. Снижение уровней и длительности возникающих выбросов параметров блокировки может быть достигнуто за счет повышения быстродействия цифровых частотных фильтров путем реализации мероприятий программного характера, предложенных, например, в [11].

Результаты исследования поведения блокировки в других режимах работы электроустановки схожи с приведенными выше и не имеют существенных и принципиальных отличий. Предложенная реализация блокировки токовой защиты обеспечивает приемлемую идентификацию режимов БТН и КЗ в электроустановках с трансформаторами.

Анализ изменения параметров блокировки в различных режимах дает основание для выбора уставки ее срабатывания  $k_{\text{бл}}$  в диапазоне 0,05–0,10, что в 1,5–3 раза меньше, чем в классической блокировке, основанной на оценке отношения второй и первой гармоник токов фаз [12].

## ВЫВОДЫ

1. Проведенные методом вычислительного эксперимента исследования подтвердили принципиальную работоспособность предложенной блокировки токовой защиты электроустановок с трансформаторами, которая обеспечивает достоверную идентификацию БТН и КЗ вне зависимости от степени насыщения трансформаторов тока.

2. Анализ результатов выполненных исследований показал, что предложенный принцип блокировки от БТН при достаточно простой реализации имеет более высокую чувствительность в сравнении с классическим, основанным на оценке отношения второй и первой гармоник токов фаз.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
2. Чернобровов, Н. В. Релейная защита энергетических систем / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. М.: Энергоатомиздат, 1998. 798 с.
3. Федосеев, А. М. Релейная защита электрических систем. Релейная защита сетей / А. М. Федосеев. М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.
4. Устройство для максимальной токовой защиты элементов энергетических систем с силовыми трансформаторами: пат. Респ. Беларусь № 16960, МПК Н 02Н 3/08, Н 02Н 3/20 / Ф. А. Романюк, А. А. Тишечкин, Е. В. Глинский, А. Г. Сапожникова. Оpubл.: 30.04.2013.
5. Романюк, Ф. А. Принципы выполнения блокировки токовой защиты электроустановок с силовыми трансформаторами / Ф. А. Романюк, А. Г. Сапожникова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 2. С. 101–107. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-2-101-107>.
6. Евдокимов, Ф. Е. Теоретические основы электротехники / Ф. Е. Евдокимов. М.: Высш. шк., 1971. С. 437–439.

7. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2011. 288 с.
8. Romaniuk, 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. Romaniuk, V. S. Kachenya, K. Kierczynski // *Przegląd Elektrotechniczny*. 2018. Vol. 1, No 7. P. 48–51. <https://doi.org/10.15199/48.2018.07.11>.
9. Цифровой измерительный орган тока для функционирования в условиях глубокого насыщения трансформатора тока / Ю. В. Румянцев [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 6. С. 483–493. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-483-493>.
10. Сопьяник, В. Х. Расчет и анализ переходных и установившихся процессов в трансформаторах тока и токовых цепях устройств релейной защиты / В. Х. Сопьяник. Минск: БГУ, 2000. С. 108–118.
11. Формирование ортогональных составляющих входных сигналов в микропроцессорных защитах / Ф. А. Романюк [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 4. С. 328–339. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-328-339>.
12. Horowitz, S. H. *Power System Relaying* / S. H. Horowitz, A. G. Phadke, J. K. Niemira. 4<sup>th</sup> ed. N.-J.: John Wiley and Sons Ltd., 2014. 400 p.

Поступила 09.06.2020 Подписана в печать 18.08.2020 Опубликовано онлайн 30.11.2020

#### REFERENCES

1. Shneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
2. Chernobrovov N. V., Semenov V. A. (1998) *Relay Protection of Electric Power Grids*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 798 (in Russian).
3. Fedoseev A. M. (1984) *Relay Protection of Electric Power Grids. Relay Protection of Electric Power Networks*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 520 (in Russian).
4. Romaniuk F. A., Tishechkin A. A., Glinskii E. V., Sapozhnikova A. G. (2013) *A Device for Overcurrent Protection Elements of Power Systems with Power Transformers*. Patent of Republic of Belarus No 16960 (in Russian).
5. Romaniuk F. A., Shapozhnikova A. G. (2017) Principles of Implementation of Blocking of Current Protection of Electrical Power Units with Transformers. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (2), 101–107. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-2-101-107> (in Russian).
6. Yevdokimov F. E. (1971) *Theoretical Foundations of Electrical Engineering*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 437–439 (in Russian).
7. Chernykh I. V. (2011) *Simulation of Electrical Devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink*. Moscow, DМК Press Publ.; St.-Petersburg, Piter Publ. 288 (in Russian).
8. Romaniuk 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 (Electrical Review)*, 1 (7), 48–51. <https://doi.org/10.15199/48.2018.07.11>.
9. Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2018) Digital Current Measurement Element for Operation During Current Transformer Severe Saturation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6), 483–493. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-483-493> (in Russian).
10. Sop'yanik V. Kh. (2000) *The Calculation and Analysis of Transient and Steady State Processes in the Transformers and Current Circuits of Relay Protection Devices*. Minsk, Belarusian State University, 108–118 (in Russian).
11. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Kachenya V. S. (2020) Orthogonal Components Forming of the Microprocessor-Bases Protection Input Signals. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (4), 328–339. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-328-339> (in Russian).
12. Horowitz S. H., Phadke A. G., Niemira J. K. (2014) *Power System Relaying*. 4<sup>th</sup> ed. John Wiley and Sons Ltd. 400.

Received: 9 June 2020

Accepted: 18 August 2020

Published online: 30 November 2020

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-500-514>

УДК 621.315.176

## Механический расчет гибких токопроводов при наличии горизонтальных сосредоточенных нагрузок

Ю. В. Бладыко<sup>1)</sup>

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020  
Belarusian National Technical University, 2020

**Реферат.** Погонная ветровая нагрузка на провода и тросы, действующая перпендикулярно проводу, зависит от угла между направлением ветра и осью воздушной линии. В методике механического расчета проводов и тросов ветер рекомендуется принимать направленным под углом  $90^\circ$  к оси пролета и не сказано, с какой стороны дует ветер. Для пролетов воздушных это не так важно, как для пролетов распределительных устройств, где отклонения проводов зависят от направления действия отпаяк к электрическим аппаратам. В статье рассматриваются различные варианты расположения отпаяк и их действие на токопровод, а также изменение направления ветра. Приведен алгоритм расчета горизонтального отклонения гибкого провода и коэффициентов его увеличения при наличии горизонтальных сосредоточенных нагрузок, обусловленных действием ветра на распорки, заградительные шары, отпайки к электрическим аппаратам и другие конструктивные элементы распределительных устройств и воздушных линий. При отсутствии ветра горизонтальные сосредоточенные нагрузки и отклонения возникают при некилевом расположении отпаяк. Выведены формулы расчета горизонтальной составляющей коэффициента нагрузки для решения уравнения состояния при наличии горизонтальных сосредоточенных сил, действующих в любых направлениях. Получены результаты механического расчета для случаев одной и двух горизонтальных сосредоточенных сил, по-разному ориентированных относительно ветровой распределенной нагрузки. Рекомендуется в проектной практике принимать направление ветра в сторону действия горизонтальных сосредоточенных сил, так как в этом случае получаются наибольшие горизонтальные отклонения и коэффициенты нагрузки. Снижение коэффициентов горизонтальной нагрузки происходит при разгрузке токопровода от встречных направлений действия ветра и горизонтальных сосредоточенных сил. При отсутствии ветра предлагается пользоваться формулами расчета горизонтальных отклонений и нагрузки после нахождения произведений коэффициента увеличения горизонтальных отклонений и горизонтальной составляющей коэффициента нагрузки на погонную нагрузку.

**Ключевые слова:** горизонтальное отклонение, тяжение, гибкий провод, гирлянды изоляторов, уравнение состояния, пролет, отпайка, коэффициент нагрузки

**Для цитирования:** Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов при наличии горизонтальных сосредоточенных нагрузок / Ю. В. Бладыко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 6. С. 500–514. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-500-514>

---

### 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](mailto: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](mailto:eie@bntu.by)

---

## Mechanical Calculation of Flexible Wires in the Presence of Horizontal Concentrated Loads

Y. V. Bladyko<sup>1)</sup>

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

**Abstract.** The linear wind load on the wires and cables acting perpendicular to the wire depends on the angle between the direction of the wind and the axis of the overhead line. In the methodology of mechanical calculation of wires and cables, it is recommended to take the wind directed at an angle of  $90^\circ$  to the axis of span and it is not specified which side the wind blows from. For spans of air, this is not so much significant as for switchgear spans, where the deviations of the wires depend on the direction of action of the taps to the electrical apparatus. The article discusses various options for the location of taps and their effect on the wire, as well as changing the direction of the wind. An algorithm for calculating the horizontal deviation of a flexible wire and its increase coefficients in the presence of horizontal concentrated loads due to the action of wind on spacers, barriers, taps to electrical apparatuses and other structural elements of substations and overhead lines is given. In the absence of wind, horizontal concentrated loads and deviations occur when an arrangement of the taps is non-keel. The formulas for calculating the horizontal component of the load coefficient to solve the equation of state in the presence of horizontal concentrated forces acting in any direction have been derived. The results of the mechanical calculation are obtained for the cases of one and two horizontal concentrated forces, differently oriented with respect to the distributed wind load. In design practice it is recommended to take the wind flow in the direction of the action of horizontal concentrated forces, since in this case the greatest horizontal deviations and load factors are obtained. The reduction in the coefficients of the horizontal load occurs when the current lead is unloaded because of the opposite directions of the wind and horizontal concentrated forces. In the absence of wind, it is proposed to use the formulas for calculating horizontal deviations and load after finding the product of the coefficient of increase in horizontal deviations and the horizontal component of the coefficient of load per linear load.

**Keywords:** horizontal deviation, tension, flexible wire, insulator strings, equation of state, span, tap, load factor

**For citation:** Bladyko Y. V. (2020) Mechanical Calculation of Flexible Wires in the Presence of Horizontal Concentrated Loads. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (6), 500–514. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-500-514> (in Russian)

### Введение

Задачей механического расчета гибких проводов распределительных устройств (РУ) и воздушных линий (ВЛ) является определение стрел провеса и тяжений в различных климатических режимах. Провод с равномерно распределенной нагрузкой рассматривается как однородная гибкая нить, имеющая очертание параболы [1]. Стрела провеса для эквивалентного провода определяется с помощью коэффициента увеличения стрелы провеса, обусловленного наличием сосредоточенных сил [2]. Составлено уравнение состояния, которое позволяет рассчитать тяжение после изменения числа сосредоточенных нагрузок, например после установки распорок, подвешивания заградительных шаров, крепления отпаяк к электрическим аппаратам. В [2] дано определение коэффициенту сосредоточенных сил как отношению суммы сосредоточенных нагрузок к весу провода в пролете. Установлена связь между коэффициентами нагрузки, увеличения стрелы

провеса и коэффициентом сосредоточенных сил. На примере пролета с натяжными гирляндами изоляторов в [3] рассматривается действие на провод сосредоточенных нагрузок, определяется погрешность при замене сосредоточенных сил равномерно распределенной вдоль пролета нагрузкой с учетом разных высот подвеса проводов и действия горизонтальных нагрузок. В [4, 5] исследуется механический расчет гибких проводов пролета ВЛ, 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.

В [6] рассматривается механический расчет гибких проводов пролетов ВЛ и РУ, в которых устанавливаются дистанционные внутрифазные или междофазные распорки как сосредоточенные нагрузки, действующие на расщепленную фазу. Предложены формулы определения стрел провеса при различном числе распорок как функции от их числа и коэффициента сосредоточенных сил. При вычислениях принимаются во внимание разность высот подвеса, натяжные гирлянды изоляторов, ветровые и гололедные нагрузки. Эти формулы, представленные в удобном для потребителей виде, могут быть использованы для компьютерной реализации механического расчета гибких проводов ВЛ и РУ в различных климатических режимах как при наличии, так и при отсутствии расщепления. Показаны погрешности замены распорок распределенной нагрузкой.

В проектной практике встречаются решения, когда в одном пролете используются различные натяжные гирлянды изоляторов. В [7] приведен расчет стрел провеса и коэффициентов нагрузки для пролета с двумя разными натяжными гирляндами изоляторов при одинаковой высоте подвеса. Система «первая натяжная гирлянда изоляторов – токопровод – вторая натяжная гирлянда изоляторов» описана уравнениями параболы. Установлена связь между коэффициентом увеличения стрелы провеса и коэффициентами, учитывающими наличие натяжных гирлянд изоляторов. Полученная компактная формула коэффициента увеличения стрелы провеса подходит в общем случае для любого сочетания гирлянд в пролете. Показано совпадение расчета для частных случаев, известных из литературных источников. Представлена формула расчета коэффициента нагрузки для уравнения состояния, учитывающая наличие разных гирлянд в пролете. Ее достоверность доказана совпадением результатов для частных случаев расположения гирлянд.

В [8] выведены формулы для кривой провисания провода при наличии одной или нескольких сосредоточенных сил и при различных натяжных гирляндах изоляторов в пролете. Получены формулы для нахождения рас-

стояния до максимальной стрелы провеса, а также расчета коэффициента нагрузки для решения уравнения состояния в случае разных гирлянд в пролете при одной и нескольких сосредоточенных силах. Достоверность формул доказана совпадением результатов для частного случая расположения гирлянд. Приводится алгоритм расчета стрел провеса при совместном действии вертикальных и горизонтальных нагрузок, а также в случае расположения точек подвеса провода на разных высотах. Предложена формула для оценки коэффициента увеличения стрелы провеса, обусловленного наличием сосредоточенных сил, равномерно распределенных вдоль пролета, и разных гирлянд изоляторов в пролете.

Численному методу механического расчета гибких токопроводов РУ и ВЛ посвящены статьи [9–11]. Разработанная компьютерная программа позволяет учитывать до трех отпаяк, принимая во внимание их реальное расположение в 12 климатических режимах, строить монтажные кривые, определять начальный режим исходя из наибольших нагрузок.

Цель статьи – определение коэффициентов для расчета стрел провеса и тяжений при горизонтальных сосредоточенных нагрузках. Они появляются при действии ветра на конструктивные элементы РУ и ВЛ: распорки, заградительные шары, отпайки к электрическим аппаратам. При отсутствии ветра горизонтальные сосредоточенные нагрузки и, следовательно, отклонения возникают при некилевом расположении отпаяк.

В [12] показано, что нормативная погонная ветровая нагрузка на провода и тросы, действующая перпендикулярно проводу (тросу), зависит от угла  $\phi$  между направлением ветра и осью ВЛ. Причем в методике механического расчета проводов и тросов ветер рекомендуется принимать направленным под углом  $90^\circ$  к оси ВЛ и не сказано, с какой стороны дует ветер. Для пролетов ВЛ это не так важно, как для пролетов РУ, где отклонения проводов зависят от направления действия отпаяк. В статье рассматриваются различные варианты расположения отпаяк и их действие на токопровод, а также изменение направления ветра.

Расчетная схема горизонтальной проекции пролета представлена на рис. 1. Показано положительное направление скорости ветра  $v$ , совпадающее с направлением горизонтальной оси  $z$ . Ветровые нагрузки действуют на провод и гирлянды изоляторов с силой:

$$Q_{z1} = q_z l_1; \quad Q_{z1} = q_{z1} l_{11}; \quad Q_{z2} = q_{z2} l_{12},$$

где  $q_z$  – погонная горизонтальная нагрузка проводов фазы;  $q_{z1}$ ,  $q_{z2}$  – то же первой и второй гирлянд изоляторов;  $l$  – длина пролета;  $l_{11}$ ,  $l_{12}$  – то же первой и второй натяжных гирлянд изоляторов;  $l_1 = l - l_{11} - l_{12}$ .

В горизонтальной плоскости действуют  $n$  сосредоточенных усилий  $P_{zi}$  ( $i = 1 \dots n$ ) от распорок, заградительных шаров или отпаяк к электрическим аппаратам.

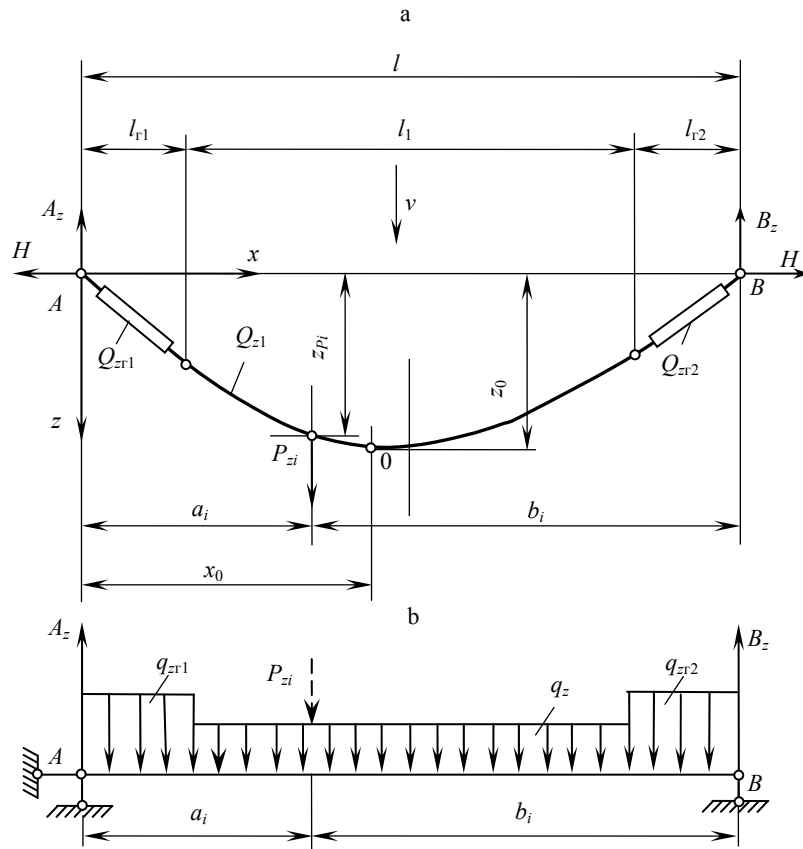


Рис. 1. Расчетная схема пролета: а – пролет с горизонтальными нагрузками от провода  $q_z$ , гирлянд изоляторов  $q_{zr1}$ ,  $q_{zr2}$  и с горизонтальными сосредоточенными силами  $P_{zi}$ ; б – пролет в виде простой разрезной балки с шарнирными опорами, загруженной так же

Fig. 1. The estimated span scheme: а – span with horizontal loads of the wire  $q_z$ , insulator strings  $q_{zr1}$ ,  $q_{zr2}$  and horizontal concentrated forces  $P_{zi}$ ;

б – span in the form of a simple split beam with hinged supports, loaded in the same way

### Расчет горизонтальных отклонений при наличии сосредоточенных сил в пролете

Отклонения провода в двух плоскостях находятся независимо друг от друга. Полученные в [2–8] выражения могут применяться и для горизонтальных составляющих нагрузок. В [8] выведена формула для оценки коэффициента увеличения стрелы провеса в вертикальной плоскости. Для горизонтальной плоскости при равномерно распределенных вдоль пролета одинаковых по величине и направлению сосредоточенных нагрузках коэффициент увеличения можно записать так:

$$K_{fz} = \frac{1 + 2\delta_{z1} + 2\delta_{z2} + (\delta_{z1} - \delta_{z2})^2 + K_{Pz}(1 + 1/n)}{\cos \theta},$$

где  $\delta_{z1} = (K_{z1} - 1)K_{r1}^2$ ,  $\delta_{z2} = (K_{z2} - 1)K_{r2}^2$  – коэффициенты, учитывающие наличие первой и второй натяжных гирлянд изоляторов при действии на

них ветровой нагрузки;  $K_{z1} = \frac{q_{zr1}}{q_z}$ ,  $K_{z2} = \frac{q_{zr2}}{q_z}$  – кратности горизонтальных погонных нагрузок первой и второй натяжных гирлянд изоляторов относительно горизонтальной погонной нагрузки провода;  $K_{r1} = \frac{l_{r1} \cos \theta}{l}$ ,  $K_{r2} = \frac{l_{r2} \cos \theta}{l}$  – то же для первой и второй натяжных гирлянд изоляторов относительно длины пролета;  $K_{Pz} = \frac{P_z \cos \theta}{q_z l}$  – коэффициент горизонтальных сосредоточенных сил;  $P_z = \sum_{i=1}^n P_{zi}$  – суммарная сила  $n$  горизонтальных сосредоточенных нагрузок;  $\theta$  – угол наклона пролета ( $\tan \theta = h/l$ );  $h$  – разность высот подвеса проводов.

Максимальное горизонтальное отклонение в этом случае рассчитывается как

$$z_0 = \frac{q_z K_{fz} l^2}{8H}, \quad (1)$$

где  $K_{fz}$  – коэффициент увеличения горизонтального отклонения;  $H$  – горизонтальная проекция тяжения в проводе.

Коэффициент увеличения отклонения, обусловленный наличием натяжных гирлянд и горизонтальных сосредоточенных сил, определяется по выражению

$$K_{fz} = \frac{8Hz_0}{q_z l^2}.$$

При отсутствии горизонтальных распределенных нагрузок ( $q_z = 0$ ) лучше пользоваться формулой нахождения произведения  $q_z K_{fz}$

$$q_z K_{fz} = \frac{8Hz_0}{l^2}. \quad (2)$$

Результирующая стрела провеса в наклонной плоскости рассчитывается после нахождения составляющих в обеих плоскостях [5].

### Расчет коэффициента нагрузки при наличии горизонтальных и вертикальных нагрузок в пролете

Длина эквивалентного провода (системы «первая натяжная гирлянда изоляторов – токопровод – вторая натяжная гирлянда изоляторов») определяется [1]

$$L = l + \frac{l^2 l_1 [(q_y K_y)^2 + (q_z K_z)^2]}{24H^2} = l + \frac{D}{2H^2}, \quad (3)$$

где интеграл  $D$  рассчитывается как:

$$D = D_y + D_z; D_y = \frac{l^2 l_1 (q_y K_y)^2}{12}; D_z = \frac{l^2 l_1 (q_z K_z)^2}{12},$$

$K_y, K_z$  – коэффициент нагрузки, учитывающий конструктивные элементы для различных климатических нагрузок, определяемый для двух плоскостей:

$$K_y^2 = \frac{12 D_y}{q_y^2 l^2 l_1}; K_z^2 = \frac{12 D_z}{q_z^2 l^2 l_1}.$$

При отсутствии горизонтальных распределенных нагрузок ( $q_z = q_{zr1} = q_{zr2} = 0$ ) лучше пользоваться формулой нахождения произведения  $q_z K_z$

$$q_z K_z = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{12 D_z}{l_1}}. \quad (4)$$

При известных конфигурациях приложения распределенных и сосредоточенных сил интеграл определяется в общем виде по формулам:

$$D_y = \int_0^l Q_y^2(x) dx; D_z = \int_0^l Q_z^2(x) dx,$$

где  $Q_y(x), Q_z(x)$  – балочная поперечная сила в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

#### Расчет горизонтальных отклонений при наличии двух сосредоточенных сил в пролете

Пусть в пролете действуют две горизонтальные сосредоточенные силы. Тогда опорные балочные реакции в горизонтальной плоскости определяются по формулам:

$$A_z = \frac{q_z l}{2} + (q_{zr1} - q_z) l_{r1} + \frac{q_z c - d}{2l} + \frac{\sum_{i=1}^2 P_{zi} b_i}{l};$$

$$B_z = \frac{q_z l}{2} + (q_{zr2} - q_z) l_{r2} - \frac{q_z c - d}{2l} + \frac{\sum_{i=1}^2 P_{zi} a_i}{l},$$

где  $c = l_{r1}^2 - l_{r2}^2$ ;  $d = q_{zr1} l_{r1}^2 - q_{zr2} l_{r2}^2$ ;  $P_{zi}$  – сила  $i$ -й сосредоточенной нагрузки, действующая в горизонтальной плоскости;  $a_i, b_i$  – расстояния до  $i$ -й сосредоточенной силы  $P_{zi}$  от опор  $A$  и  $B$ .

Для построения зависимости горизонтальных отклонений от координаты  $x$  определим  $z(x)$  на всех участках:

$$z_1(x) = \frac{1}{H} \left[ A_z x - \frac{q_{zr1} x^2}{2} \right] \text{ при } 0 \leq x \leq l_{r1};$$

$$z_2(x) = \frac{1}{H} \left[ A_z x - q_{zr1} l_{r1} \left( x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - \frac{q_z (x - l_{r1})^2}{2} \right] \text{ при } l_{r1} < x \leq a_1;$$

$$z_3(x) = \frac{1}{H} \left[ A_z x - q_{zr1} l_{r1} \left( x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - \frac{q_z (x - l_{r1})^2}{2} - P_{z1} (x - a_1) \right] \text{ при } a_1 < x \leq a_2;$$

$$z_4(x) = \frac{1}{H} \left[ A_z x - q_{zr1} l_{r1} \left( x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - \frac{q_z (x - l_{r1})^2}{2} - \sum_{i=1}^2 P_{zi} (x - a_i) \right] \\ \text{при } a_2 < x \leq l - l_{r2};$$

$$z_5(x) = \frac{1}{H} \left[ A_z x - q_{zr1} l_{r1} \left( x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - q_z l_1 \left( x - l_{r1} - \frac{l_1}{2} \right) - \right. \\ \left. - q_{zr2} \frac{(x - l + l_{r2})^2}{2} - \sum_{i=1}^2 P_{zi} (x - a_i) \right] \text{ при } l - l_{r2} < x \leq l.$$

Для случаев расположения максимального отклонения провода на разных участках расстояние до него рассчитывается по формулам:

$$x_{z0} = \frac{A_z}{q_{zr1}} \text{ при } 0 \leq x_{z0} \leq l_{r1}; \quad x_{z0} = \frac{A_z - q_{zr1} l_{r1}}{q_z} + l_{r1} \text{ при } l_{r1} < x_{z0} \leq a;$$

$$x_{z0} = \frac{A_z - P_{z1} - q_{zr1} l_{r1}}{q_z} + l_{r1} \text{ при } a_1 < x_{z0} \leq a_2;$$

$$x_{z0} = \frac{A_z - \sum_{i=1}^2 P_{zi} - q_{zr1} l_{r1}}{q_z} + l_{r1} \text{ при } a_2 < x_{z0} \leq l - l_{r2};$$

$$x_{z0} = \frac{A_z - \sum_{i=1}^2 P_{zi} - q_z l_1 - q_{zr1} l_{r1}}{q_{zr2}} + l - l_{r2} \text{ при } l - l_{r2} < x_{z0} \leq l.$$

После нахождения расстояния до максимального отклонения последнее можно рассчитать по формуле  $z_0 = z(x_{z0})$ . Если не выполняются вышеприведенные неравенства, то максимальное горизонтальное отклонение провода будет находиться в точке приложения одной из сосредоточенных сил  $x_{z0} = a_i$ , дающей  $z_0 = \max [z(a_i)]$ .

При отсутствии ветра ( $q_z = 0$ ) лучше пользоваться формулой нахождения произведения  $q_z K_{fz}$ , тогда максимальное отклонение без проблем определяется по (1).

### Расчет коэффициента горизонтальной нагрузки при наличии двух сосредоточенных сил

Интеграл  $D_z$  для формулы (3)

$$D_z = \int_0^{l_{r1}} Q_1^2(x) dx + \int_{l_{r1}}^{a_1} Q_2^2(x) dx + \int_{a_1}^{a_2} Q_3^2(x) dx + \int_{a_2}^{l-l_{r2}} Q_4^2(x) dx + \int_{l-l_{r2}}^l Q_5^2(x) dx,$$

где  $Q_1(x)$ – $Q_5(x)$  – балочная поперечная сила соответственно на первой гирлянде, участках провода и второй гирлянде:

$$Q_1(x) = A_z - q_{zr1}x;$$

$$Q_2(x) = A_z - q_{zr1}l_{r1} - q_z(x - l_{r1});$$

$$Q_3(x) = A_z - P_{z1} - q_{zr1}l_{r1} - q_z(x - l_{r1});$$

$$Q_4(x) = A_z - P_{z1} - P_{z2} - q_{zr1}l_{r1} - q_z(x - l_{r1});$$

$$Q_5(x) = A_z - P_{z1} - P_{z2} - q_{zr1}l_{r1} - q_zl_1 - q_{zr2}(x - l + l_{r2}).$$

Расчеты выполнялись для следующих исходных данных: длина пролета  $l = 80$  м, провод 264/34 ACSR подвешен на одинаковой высоте, тяжеение  $H = 1000$  даН, длины натяжных гирлянд изоляторов  $l_{r1} = l_{r2} = 2$  м. Рассматривалось влияние на горизонтальные отклонения и составляющую коэффициента нагрузки горизонтальных сосредоточенных нагрузок, расположенных на расстоянии  $a_1 = 25$  м и  $a_2 = 55$  м от начала пролета. Результаты расчета приведены на рис. 2 и в табл. 1.

Как видно из расчетов, расстояние до максимального горизонтального отклонения зависит от расположения и направления сосредоточенных сил, их величины, а также от различия натяжных гирлянд изоляторов. При отсутствии ветра (рис. 2а, б) наибольшее горизонтальное отклонение наблюдается в точках приложения сосредоточенных сил. Для одинаковых гирлянд изоляторов в случае сонаправленного действия ветра и сосредоточенных сил максимальное горизонтальное отклонение будет близко к центру пролета (рис. 2с). При совпадении направления ветра и одной из сосредоточенных сил максимальное горизонтальное отклонение будет близко к точке приложения последней (рис. 2е, ф, г). При встречном действии ветра и сосредоточенных сил максимум отклонения приходится на точку их приложения (рис. 2д). В остальных случаях отклонение зависит от сочетания исходных данных (рис. 2h).

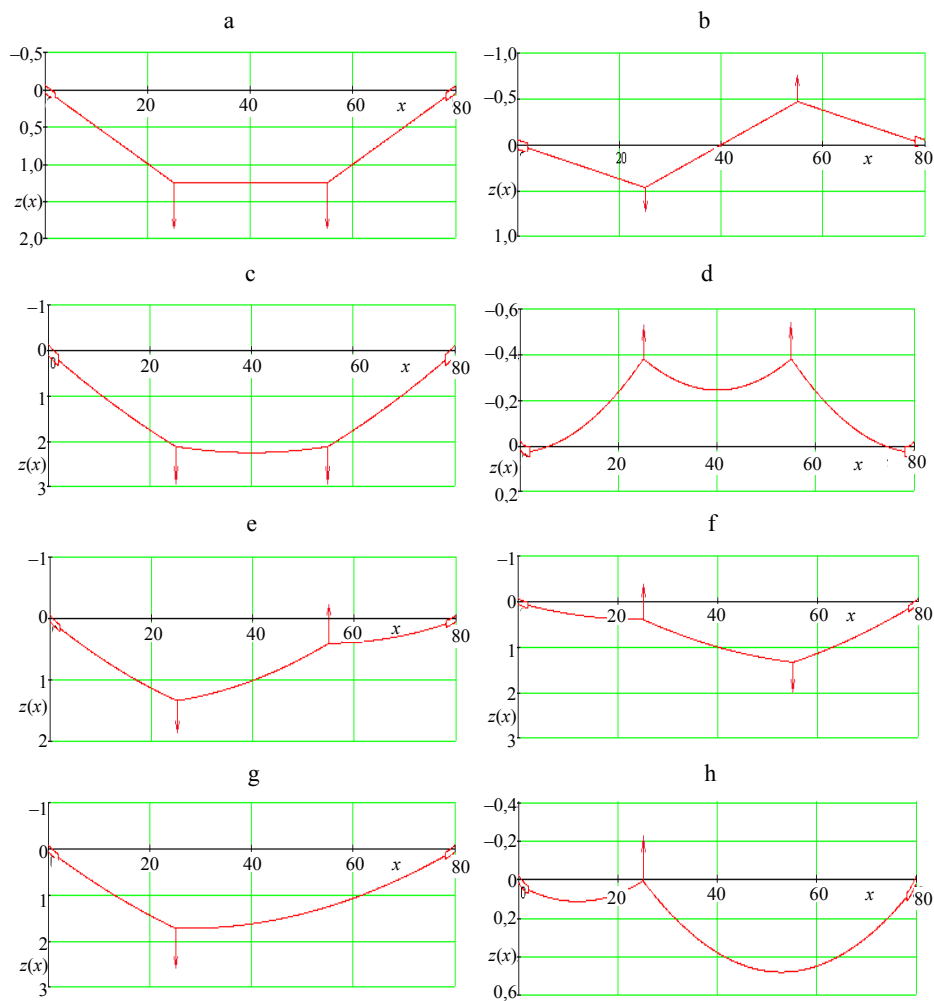


Рис. 2. Кривые горизонтальных отклонений провода в пролете длиной  $l = 80$  м с натяжными гирляндами изоляторов  $l_{r1} = l_{r2} = 2$  м, горизонтальными сосредоточенными силами  $P_{zi} = 50$  даН и тяжением  $H = 1000$  даН: а, б – без ветра; с–h – с ветровой нагрузкой на провод  $q_z = 1,22$  даН/м и гирлянды изоляторов  $q_{zr} = q_{zr1} = q_{zr2} = 16,3$  даН/м

Fig. 2. The curves of horizontal deviations of a wire in a span of length  $l = 80$  m with tensioning insulators strings  $l_{r1} = l_{r2} = 2$  m, horizontal concentrated forces  $P_{zi} = 50$  daN and tension  $H = 1000$  daN: a, b – without wind; c–h – in the presence of a wind load on the wire  $q_z = 1.22$  daN/m and insulator strings  $q_{zr} = q_{zr1} = q_{zr2} = 16.3$  daN/m

Максимальное горизонтальное отклонение зависит от параметров пролета и нагрузки, а также от направления ветра. При отсутствии ветра отклонение по формуле (1) можно найти, если известно произведение  $q_z K_{fz}$  (значение в табл. 1 дано в скобках). Наибольшее горизонтальное отклонение происходит для пролетов с распорками и заградительными шарами, а также при совпадении направления ветра и сосредоточенных сил от отпаяк (рис. 2с), наименьшее – при силах от отпаяк, противоположных направлению ветра (рис. 2д). При разнонаправленных силах от отпаяк (рис. 2е, f) коэффициент увеличения горизонтального отклонения при-

нимает промежуточные значения. При изменении горизонтальной силы от отпаяк, направленной в противоположную ветру сторону, отклонение может изменить знак (табл. 1, пп. 11, 13).

Таблица 1

### Результаты механического расчета гибких токопроводов при различных горизонтальных нагрузках

### The results of mechanical calculation of flexible wires at various horizontal loads

| № пп | Рисунок | Скорость ветра, м/с | Горизонтальная нагрузка на провод $q_{z1}$ , даН/м | Горизонтальная нагрузка на гирлянду $q_{z2}$ , даН/м | Горизонтальная сила от оттайки $P_{z1}$ , даН | Горизонтальная сила от оттайки $P_{z2}$ , даН | Коэффициент горизонтальных сосредоточенных сил $K_{pz}$ ( $q_z K_{pz}$ ) | Расстояние до максимального отклонения по горизонтали $x_{z0}$ | Коэффициент увеличения горизонтального отклонения $K_{z2}$ ( $q_z K_{z2}$ ) | Горизонтальная составляющая коэффициента нагрузки $K_z$ ( $q_z K_z$ ) |
|------|---------|---------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 1    | Рис. 2а | 0                   | 0                                                  | 0                                                    | 50                                            | 50                                            | (1,250)                                                                  | 25–55                                                          | (1,563)                                                                     | (1,756)                                                               |
| 2    | –       |                     |                                                    |                                                      | –50                                           | –50                                           | (–1,250)                                                                 | 25–55                                                          | (–1,563)                                                                    | (1,756)                                                               |
| 3    | Рис. 2б |                     |                                                    |                                                      | 50                                            | –50                                           | (0)                                                                      | 25 и 55                                                        | (0,586)                                                                     | (1,075)                                                               |
| 4    | –       |                     |                                                    |                                                      | 50                                            | 0                                             | (0,625)                                                                  | 25                                                             | (1,074)                                                                     | (1,030)                                                               |
| 5    | –       |                     |                                                    |                                                      | 100                                           | 0                                             | (1,250)                                                                  | 25                                                             | (2,148)                                                                     | (2,059)                                                               |
| 6    | Рис. 2с | 30                  | 1,22                                               | 16,3                                                 | 50                                            | 50                                            | 1,025<br>(1,250)                                                         | 40                                                             | 2,312<br>(2,821)                                                            | 2,474 (3,018)                                                         |
| 7    | Рис. 2д |                     |                                                    |                                                      | –50                                           | –50                                           | –1,025<br>(–1,250)                                                       | 25 и 55                                                        | –0,390<br>(–0,476)                                                          | 0,600 (0,732)                                                         |
| 8    | Рис. 2е |                     |                                                    |                                                      | 50                                            | –50                                           | 0                                                                        | 25                                                             | 1,371<br>(1,673)                                                            | 1,395 (1,702)                                                         |
| 9    | Рис. 2ф |                     |                                                    |                                                      | –50                                           | 50                                            | 0                                                                        | 55                                                             | 1,371<br>(1,673)                                                            | 1,395 (1,702)                                                         |
| 10   | Рис. 2г |                     |                                                    |                                                      | 50                                            | 0                                             | 0,512<br>(0,625)                                                         | 27                                                             | 1,774<br>(2,164)                                                            | 1,822 (2,223)                                                         |
| 11   | Рис. 2з |                     |                                                    |                                                      | –50                                           | 0                                             | –0,512<br>(–0,625)                                                       | 53                                                             | 0,493<br>(0,602)                                                            | 0,664 (0,810)                                                         |
| 12   | –       |                     |                                                    |                                                      | 100                                           | 0                                             | 1,025<br>(1,250)                                                         | 25                                                             | 2,651<br>(3,234)                                                            | 2,626 (3,204)                                                         |
| 13   | –       |                     |                                                    |                                                      | –100                                          | 0                                             | –1,025<br>(–1,250)                                                       | 25                                                             | –0,871<br>(–1,063)                                                          | 1,066 (1,301)                                                         |
| 14   | –       | –30                 | –1,22                                              | –16,3                                                | 50                                            | 50                                            | –1,025<br>(1,250)                                                        | 25                                                             | 0,390<br>(0,476)                                                            | 0,600 (0,732)                                                         |
| 15   | –       |                     |                                                    |                                                      | –50                                           | –50                                           | 1,025<br>(–1,250)                                                        | 40                                                             | –2,312<br>(–2,821)                                                          | 2,474 (3,018)                                                         |
| 16   | –       |                     |                                                    |                                                      | 50                                            | –50                                           | 0                                                                        | 55                                                             | –1,371<br>(–1,673)                                                          | 1,395 (1,702)                                                         |

**Примечание.** Знак «минус» означает направление, противоположное принятому положительному направлению горизонтальной оси  $z$ .

Горизонтальная составляющая коэффициента нагрузки также зависит от параметров провода и гирлянд изоляторов, на нее влияют климатические условия и направление ветра. При отсутствии ветра ее можно найти после определения произведения  $q_z K_z$  по формуле (4) (в табл. 1 значение дано в скобках). Максимальное значение будет для пролетов с распорками и заградительными шарами, а также при совпадении направления ветра и сосредоточенных сил от отпаяк (табл. 1, пп. 6, 12, 15). В случае безветрия – при направлении сосредоточенных сил в одну сторону (табл. 1, пп. 1, 2). При воздействии сосредоточенных сил в противоположном действии ветра направлении токопровод разгружается (табл. 1, пп. 7, 11, 14). То же в безветрие при разнонаправленных силах (табл. 1, п. 3). Коэффициент нагрузки принимает промежуточные значения при разнонаправленных силах от отпаяк и ветре (табл. 1, пп. 8, 9, 16).

На рис. 3 представлена зависимость произведений  $q_z K_{fz}$  и  $q_z K_z$  от произведения коэффициента горизонтальных сосредоточенных сил на погонную нагрузку на провод  $q_z K_P$  при одной горизонтальной сосредоточенной силе в середине пролета при наличии ветра и без него. Они представляют практически пропорциональную зависимость от сосредоточенной силы, небольшое отклонение от прямой связано с изменением местоположения максимальной стрелы провеса при встречных распределенных ветровых и сосредоточенной нагрузках (рис. 3а). V-образные характеристики коэффициентов нагрузки также объясняются разгрузкой токопровода от встречных направлений действия ветра и горизонтальной сосредоточенной силы (рис. 3б).

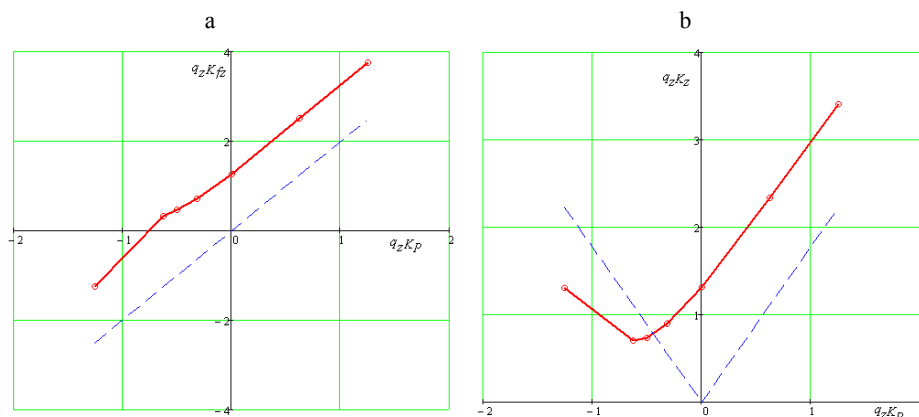


Рис. 3. Зависимость коэффициентов увеличения горизонтальных отклонений (а) и нагрузки (б) провода от коэффициента сосредоточенных сил в пролете длиной  $l = 80$  м, натяжением  $H = 1000$  даН, с натяжными гирляндами изоляторов  $l_{r1} = l_{r2} = 2$  м при одной горизонтальной сосредоточенной силе в середине пролета: синяя штриховая линия – без ветра; красная сплошная – с ветровой нагрузкой на провод  $q_z = 1,22$  даН/м и гирлянды изоляторов  $q_{z1} = q_{z1} = q_{z2} = 16,3$  даН/м

Fig. 3. Dependence of the coefficients of increase in horizontal deviations (a) and load (b) on the wire on the coefficient of concentrated forces in a span of length  $l = 80$  m, tension  $H = 1000$  daN, with tensioning insulator strings  $l_{r1} = l_{r2} = 2$  m when there is one horizontal concentrated force in the middle of the span: blue dashed line – without wind; solid red line – with wind load on the wire  $q_z = 1.22$  daN/m and on insulator strings  $q_{z1} = q_{z1} = q_{z2} = 16.3$  daN/m

### ВЫВОДЫ

1. Выведены формулы горизонтального отклонения гибкого провода и коэффициентов его увеличения при наличии горизонтальных сосредоточенных нагрузок, обусловленных действием ветра на распорки, заградительные шары, отпайки к электрическим аппаратам и другие конструктивные элементы РУ и ВЛ. При отсутствии ветра горизонтальные сосредоточенные нагрузки и отклонения возникают при некилевом расположении отпаяк.

2. Выведены формулы расчета горизонтальной составляющей коэффициента нагрузки для решения уравнения состояния в случае разных гирлянд в пролете при наличии горизонтальных сосредоточенных сил, действующих в любых направлениях.

3. Получены результаты механического расчета для случаев одной и двух горизонтальных сосредоточенных сил, по-разному ориентированных относительно ветровой распределенной нагрузки.

4. Рекомендуется в проектной практике принимать направление ветра в сторону действия горизонтальных сосредоточенных сил, так как в этом случае получаются наибольшие горизонтальные отклонения и коэффициенты нагрузки. Снижение коэффициентов горизонтальной нагрузки происходит при разгрузке токопровода от встречных направлений действия ветра и горизонтальных сосредоточенных сил.

5. При отсутствии ветра формулами (1) и (3) можно пользоваться после нахождения произведений  $q_z K_{fz}$  и  $q_z K_z$  по (2) и (4).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бошнякович, А. Д. Расчет проводов подстанций и больших переходов ЛЭП / А. Д. Бошнякович. Л.: Энергия, 1975. 248 с.
2. 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>.
3. 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>.
4. 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>.
5. 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>.
6. Бладыко, Ю. В. Учет распорок в механическом расчете гибких проводов воздушных линий и распределительных устройств / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. за-

- ведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 3. С. 219–231. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-219-231>.
7. Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов пролетов с разными натяжными гирляндами изоляторов / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 1. С. 55–65. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-55-65>.
  8. Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов с сосредоточенными нагрузками / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 2. С. 103–115. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-103-115>.
  9. Стрелюк, М. И. Векторно-параметрический метод механического расчета гибких токопроводов электроустановок энергосистем / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Математические методы в электроэнергетике: материалы II Междунар. симпози. / Польская академия наук. Закопане, 10–12 нояб. 1988. Закопане, 1988. С. 173–181.
  10. Streluk, M. I. Computer Aided Program of Mechanical Calculation of Flexible Conductors for Substations and Overhead Lines Design / M. I. Streluk, I. I. Sergey, Y. V. Bladyko // New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation: Proc. Int. Conf. Lublin Technical University. Lublin (Poland), 7–8 Sept. 1995. Lublin, 1995. P. 15–19.
  11. 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.
  12. 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 приемосдаточных испытаний: ТКП 339–2011 (02230). Введ. 01.12.2011. Минск: Минэнерго, 2011. 593 с.

Поступила 25.02.2020    Подписана в печать 28.04.2020    Опубликовано онлайн 30.11.2020

## REFERENCES

1. Boshnyakovich A. D. (1975) *Calculation of the Wires of Substations and Large Transitions of Transmission Lines*. Leningrad, Energiya Publ. 248 (in Russian).
2. 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 the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (2), 97–107. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-97-107> (in Russian).
3. Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires when a Concentrated Load is being Replaced with a Distributed One Taking into Account the Structural Elements. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 220–234. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-220-234> (in Russian).
4. 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 the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (4), 299–309. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-299-309> (in Russian).
5. Bladyko Y. V. (2019) Mechanical Calculation of Flexible Wires of Overhead Lines with Aerial Barrage Balls in Different Climatic Regimes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher*

- Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 24–36. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-24-36> (in Russian).
6. Bladyko Y. V. (2019) Accounting for Spacers in the Mechanical Calculation of Flexible Wires for Overhead Lines and Switchgears. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (3), 219–231. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-219-231> (in Russian).
  7. Bladyko Y. V. (2020) Mechanical Calculation of Flexible Wires of Spans with Different Tensioning Insulator Strings. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (1), 55–65. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-55-65> (in Russian).
  8. Bladyko Y. V. (2020) Mechanical Calculation of Flexible Wires Loaded with Concentrated Loads. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (2), 103–115. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-103-115> (in Russian).
  9. Strelyuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Y. V. (1988) Vector-Parametric Method of Mechanical Calculation of Flexible Current Wires of Electrical Installations of Power Systems. *Matematicheskie Metody v Elektroenergetike: Materialy II Mezhdunar. Simpoz. Zakopane, 10–12 Noyab. 1988* [Mathematical Methods in the Electric Power Industry: Materials of the II International Symposium. Zakopane, 10–12 Nov. 1988]. Zakopane, 173–181 (in Russian).
  10. Streliuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Y. V. (1995) Computer Aided Program of Mechanical Calculation of Flexible Conductors for Substations and Overhead Lines Design. *New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation: Proc. Int. Conf. Lublin (Poland), 7–8 Sept. Lublin*, Lublin Technical University, 15–19.
  11. Strelyuk M. I., Sergei I. I., Bladyko Y. V. (1995) Numerical Method of Mechanical Calculation of Flexible Current Conductors of Power Units of Power Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions*, (3–4), 21–29 (in Russian).
  12. 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 Implementation and Protective Measures of Electrical Safety. Electricity Accounting. Norms of Acceptance Testing*. Minsk, Minenergo Publ. 593 (in Russian).

Received: 25 February 2020

Accepted: 28 April 2020

Published online: 30 November 2020

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-515-525>

УДК 621.311.001.57

## Модель фотоэлектрического модуля для библиотеки SimPowerSystems пакета MatLab/Simulink

Д. И. Зализный<sup>1)</sup>

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020  
Belarusian National Technical University, 2020

**Реферат.** Актуальность исследований обусловлена увеличением количества фотоэлектростанций в Республике Беларусь и, соответственно, необходимостью решения задач диагностики фотоэлектрических модулей. Предложена новая Simulink-модель фотоэлектрического модуля, ориентированная на использование стандартной библиотеки элементов систем электроснабжения SimPowerSystems из программного пакета MatLab/Simulink. Модель позволяет изменять значения солнечного излучения для каждого фотоэлемента модуля, а также получать расчетные значения напряжений и токов на выходе фотоэлектрического модуля. С помощью модели можно выполнять имитацию затенения отдельных фотоэлементов модуля. Разработанная Simulink-модель функционирует на основе известной экспоненциальной зависимости, описывающей вольт-амперную характеристику фотоэлектрического модуля, и учитывает реальную схему модуля с обходными диодами. Последовательное сопротивление фотоэлектрического модуля рассчитывается на основе разности между его экспериментальными и теоретическими вольт-амперными характеристиками для условий, близких к нормальным. Simulink-модель модуля SF-P672300 содержит 72 нелинейных элемента, реализованных на основе управляемых источников тока и соединенных последовательно. В модели решены проблемы устойчивости алгоритма расчета алгебраических циклов за счет введения параметров ограничений по напряжениям и токам. Экспериментальные исследования для полностью освещенного и частично затененного модуля SF-P672300 показали, что максимальная относительная погрешность разработанной Simulink-модели не превышает 15 %. Приведены экспериментальные и теоретические вольт-амперные характеристики модуля SF-P672300 при полном освещении и частичном затенении. Предлагаемая Simulink-модель может быть использована на этапе как проектирования, так и эксплуатации фотоэлектростанций с целью имитации и анализа факторов, влияющих на их работу.

**Ключевые слова:** Simulink-модель, фотоэлектрический модуль, вольт-амперная характеристика, SimPowerSystems, имитационное моделирование, частичное затенение, обходной диод

**Для цитирования:** Зализный, Д. И. Модель фотоэлектрического модуля для библиотеки SimPowerSystems пакета MatLab/Simulink / Д. И. Зализный // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 6. С. 515–525. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-515-525>

---

### Адрес для переписки

Зализный Дмитрий Иванович  
Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого  
просп. Октября, 48,  
246746, г. Гомель, Республика Беларусь  
Тел.: +375 232 40-57-64  
[zaldmi@yandex.ru](mailto:zaldmi@yandex.ru)

### Address for correspondence

Zalizny Dmitry I.  
Sukhoi State Technical  
University of Gomel  
48, Octiabria Ave.,  
246746, Gomel, Republic of Belarus  
Tel.: +375 232 40-57-64  
[zaldmi@yandex.ru](mailto:zaldmi@yandex.ru)

---

## Model of a Photovoltaic Module for the MatLab/Simulink SimPowerSystems Library

D. I. Zalizny<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Sukhoi State Technical University of Gomel (Gomel, Republic of Belarus)

**Abstract.** The relevance of research is caused by the increase of the number of photovoltaic power plants in the Republic of Belarus and, accordingly, the need to solve problems of diagnostics of photovoltaic modules. A new Simulink model of a photovoltaic module focused on using the standard SimPowerSystems library of power supply system elements (a part of the MatLab/Simulink) is proposed. The model allows altering solar irradiation values for each solar cell of the module. The use of the model also makes it possible to obtain calculated values of voltages and currents at the photovoltaic module output. In addition, the model provides the simulation of individual solar cells shading in the module. The developed Simulink model operates on the base of a well-known exponential dependence describing the volt-ampere characteristic of a photovoltaic module, and also takes into account the real circuit of the module with bypass diodes. The series resistance of the photovoltaic module is calculated by the subtraction between its experimental and theoretical volt-ampere characteristics for conditions that are close to normal. The Simulink model of the SF-P672300 module contains 72 non-linear elements implemented on the basis of controlled current sources and connected in series. The model solved the problems of the algorithm stability for calculating algebraic cycles by introducing constraint the current and the voltage parameters. Experimental studies for the fully illuminated and partially shaded SF-P672300 module have demonstrated that the maximum relative error of the developed Simulink model does not exceed 15 %. Experimental and theoretical current-voltage characteristics of the SF-P672300 module under full illumination and partial shading are presented. The presented Simulink model may be used both at the design stage and at the operation stage of photovoltaic power plants in order to simulate and analyze the factors that affect the operation of them.

**Keywords:** Simulink model, photovoltaic module, volt-ampere characteristic, SimPowerSystems, simulation modeling, partial shading, bypass diode

**For citation:** Zalizny D. I. (2020) Model of a Photovoltaic Module for the MatLab/Simulink SimPowerSystems Library. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (6), 515–525. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-515-525> (in Russian)

### Введение

За последнее десятилетие на территории Республики Беларусь значительно увеличилось количество фотоэлектростанций. Некоторые из них имеют номинальную мощность более 50 МВт, т. е. содержат сотни тысяч фотоэлектрических модулей. Каждый модуль выполнен из 60–78 хрупких полупроводниковых фотоэлементов с нанесенными с внешней стороны тонкими электродами. Эта конструкция подвергается постоянному воздействию окружающей среды и отдает в нагрузку значительные токи. Очевидно, что со временем модули будут деградировать, т. е. их энергетические показатели будут снижаться.

В процессе эксплуатации на фотоэлектрические модули могут попадать загрязнения, а также тени от соседних объектов или облаков. Это существенно влияет на их вольт-амперные характеристики и соответственно на работу всей электростанции.

Таким образом, очевидно, что задачи диагностирования и прогнозирования работы фотоэлектрических модулей для Республики Беларусь актуальны и должны прорабатываться в научной сфере.

Фотоэлементы и фотоэлектрические модули являются нелинейными элементами с точки зрения электротехники. Поэтому расчеты их электрических режимов достаточно сложны и требуют специального программного обеспечения, такого как известный во всем мире пакет MatLab/Simulink и его библиотека для расчета электроэнергетических схем SimPowerSystems.

Цель представленных исследований – создать удобную модель фотоэлектрического модуля для библиотеки SimPowerSystems пакета MatLab/Simulink, позволяющую анализировать влияние внешних факторов на вольт-амперные характеристики этого модуля.

### Аналитический обзор источников литературы

В зарубежной научной печати рассматриваемые задачи изучаются очень широко. Так, в [1–5] предложены модели фотоэлементов для базовой библиотеки Simulink, что не очень удобно для моделирования электрических схем, и почти не рассматриваются вопросы затенения и деградации модулей.

В [6–8] разработаны более удобные для применения в электрических схемах модели, позволяющие работать в том числе с библиотекой SimPowerSystems. Однако эти модели не рассчитаны на имитацию затенения и деградации отдельных фотоэлементов.

Вопросы частичного затенения модулей подробно изучены в [9–12] на основе как MatLab, так и экспериментальных исследований. Но при этом ни одна из описанных моделей не рассчитана на работу с отдельными фотоэлементами.

В целом, анализируя научные публикации, можно сделать вывод, что авторы не дают исчерпывающей информации о тех сложностях, с которыми они столкнулись в процессе моделирования. К их числу, в первую очередь, относятся проблемы больших чисел, выходящих за допустимый предел из-за экспоненциальных зависимостей в формулах для вольт-амперных характеристик модулей, и проблемы алгебраических циклов при расчете нелинейных систем больших размерностей. Решение этих трудностей является ключевой задачей при моделировании фотоэлектрических модулей в системе MatLab.

### Схема фотоэлектрического модуля

подавляющее большинство промышленных фотоэлектрических модулей выполняется по схеме, представленной на рис. 1а.

В модуле имеются, как правило, шесть блоков по 8–15 фотоэлементов в каждом. Все фотоэлементы и блоки соединены последовательно. Таким образом, в исправном равномерно освещенном модуле напряжение на нагрузке равно:

$$U_n = U_{BL} N, \quad (1)$$

где  $U_{BL}$  – напряжение, вырабатываемое одним фотоэлементом;  $N$  – количество фотоэлементов в модуле.

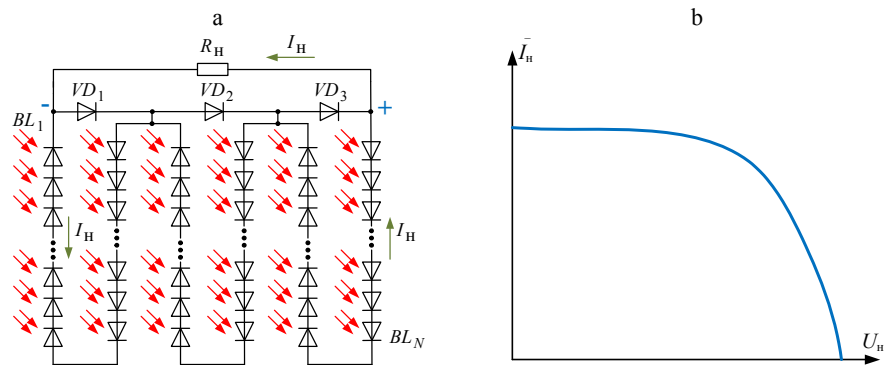


Рис. 1. Фотоэлектрический модуль при равномерной освещенности:  
а – принципиальная схема; б – вольт-амперная характеристика

Fig. 1. A uniformly illuminated PV-module:  
a – scheme; б – voltage-current characteristic

На катоде первого фотоэлемента  $BL_1$  формируется отрицательный потенциал, а на аноде последнего фотоэлемента  $BL_N$  – положительный. Ток нагрузки  $I_H$  протекает через обратносмещенные  $p$ - $n$ -переходы фотоэлементов и через нагрузку.

Параллельно каждой паре блоков в модулях подключаются обходные диоды (bypass diodes)  $VD_1$ – $VD_3$ . В равномерно освещенном модуле эти диоды закрыты и вольт-амперная характеристика близка по форме к характеристике источника тока (рис. 1б).

При затенении или деградации каких-либо фотоэлементов возрастает их сопротивление и сопротивление всего блока, так как все фотоэлементы соединены последовательно. В этом случае ток нагрузки может начать протекать через обходной диод, минуя два блока, как показано на рис. 2а.

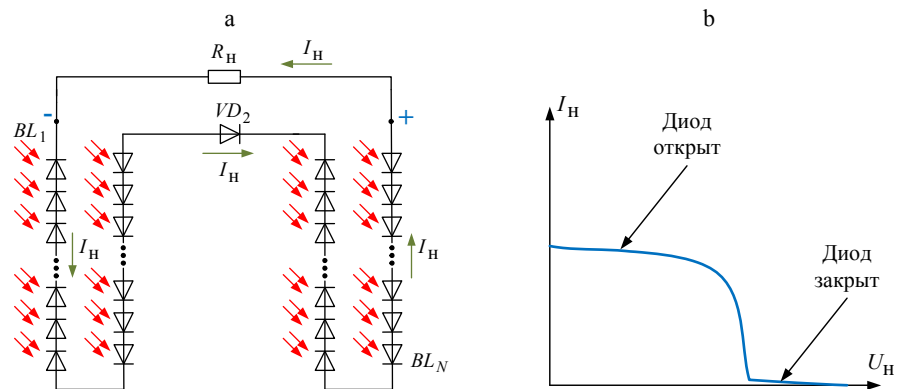


Рис. 2. Фотоэлектрический модуль при затенении в центральной части:  
а – путь протекания тока нагрузки модуля; б – вольт-амперная характеристика

Fig. 2. A PV-module under shadowing in the middle area:  
а – load current path; б – voltage-current characteristic

Обходные диоды нужны для того, чтобы модуль полностью не выключался из работы при затенении только одного фотоэлемента. Если затенить один фотоэлемент, из работы будут выключены два блока, однако четыре

продолжат отдавать ток в нагрузку, естественно, при более низком генерируемом напряжении. Для полного выключения модуля из работы достаточно закрыть по одному фотоэлементу по краям и в центре.

Вольт-амперная характеристика затененного модуля имеет излом в области отпирания обходных диодов (рис. 2b).

### Simulink-модель фотоэлектрического модуля

В [13] предложена Simulink-модель фотоэлемента, функционирующая на основе уравнения его вольт-амперной характеристики [14]:

$$I_{vd} = I_0 \left( e^{\frac{11594,2 \cdot U_{ph}}{\theta + 273}} - 1 \right) - K_{ph} S, \quad (2)$$

где  $I_{vd}$  – суммарный ток через  $p$ – $n$ -переход фотоэлемента, А;  $I_0$  – обратный ток  $p$ – $n$ -перехода при отсутствии солнечного излучения, А;  $U_{ph}$  – напряжение, генерируемое фотоэлементом, В;  $\theta$  – температура  $p$ – $n$ -перехода, °С;  $K_{ph}$  – коэффициент пропорциональности между фототоком и солнечным излучением, А · м<sup>2</sup>/Вт;  $S$  – солнечное излучение, Вт/м<sup>2</sup>.

Расчетными параметрами имитационной модели являются величины  $I_0$  и  $K_{ph}$ . В [13] разработана удобная методика определения этих параметров на основе экспериментальных данных по фотоэлектрическому модулю.

Для создания Simulink-модели фотоэлектрического модуля будем использовать модель фотоэлемента из [13] и схему на рис. 1а. В качестве прототипа для модели примем модуль SF-P672300, состоящий из 72 фотоэлементов.

После измерений с помощью прибора SOLAR I-Vw фирмы НТ ITALIA были получены следующие результаты:  $S = 1057,5$  Вт/м<sup>2</sup>;  $\theta = 30,3$  °С;  $I_1 = 0,199$  А;  $U_1 = 42,2$  В;  $I_2 = 8,61$  А;  $U_2 = 0,5$  В. Результаты расчетов в соответствии с методикой в [13]:  $I_0 = -1,565 \cdot 10^{-9}$  А;  $K_{ph} = 8,14 \cdot 10^{-3}$  А · м<sup>2</sup>/Вт.

Кроме  $I_0$  и  $K_{ph}$ , исходным параметром модели является последовательное сопротивление фотоэлемента  $R_s$ . Методика его расчета, основанная на вычитании теоретической вольт-амперной характеристики по формуле (2) из экспериментальной вольт-амперной характеристики модуля, также разработана в [13]. Для рассматриваемого модуля SF-P672300 при разности напряжений  $\Delta U = 10$  В разность токов составит  $\Delta I = 8,2$  А. Тогда

$$R_s = \frac{\Delta U}{\Delta I N} = \frac{10}{8,2 \cdot 72} = 16,9 \text{ мОм}, \quad (3)$$

где  $N$  – количество фотоэлементов в модуле.

Схема предлагаемой Simulink-модели фотоэлектрического модуля показана на рис. 3.

На схеме представлены три блока, содержащие по 24 последовательно соединенных фотоэлемента, каждый из которых имеет отдельный вход для за-

дания значения солнечного излучения. Это позволяет выполнять имитацию затенения любых фотоэлементов в модуле. Так, на рис. 3 приведен пример, когда закрыты четыре фотоэлемента в нижней части среднего блока.

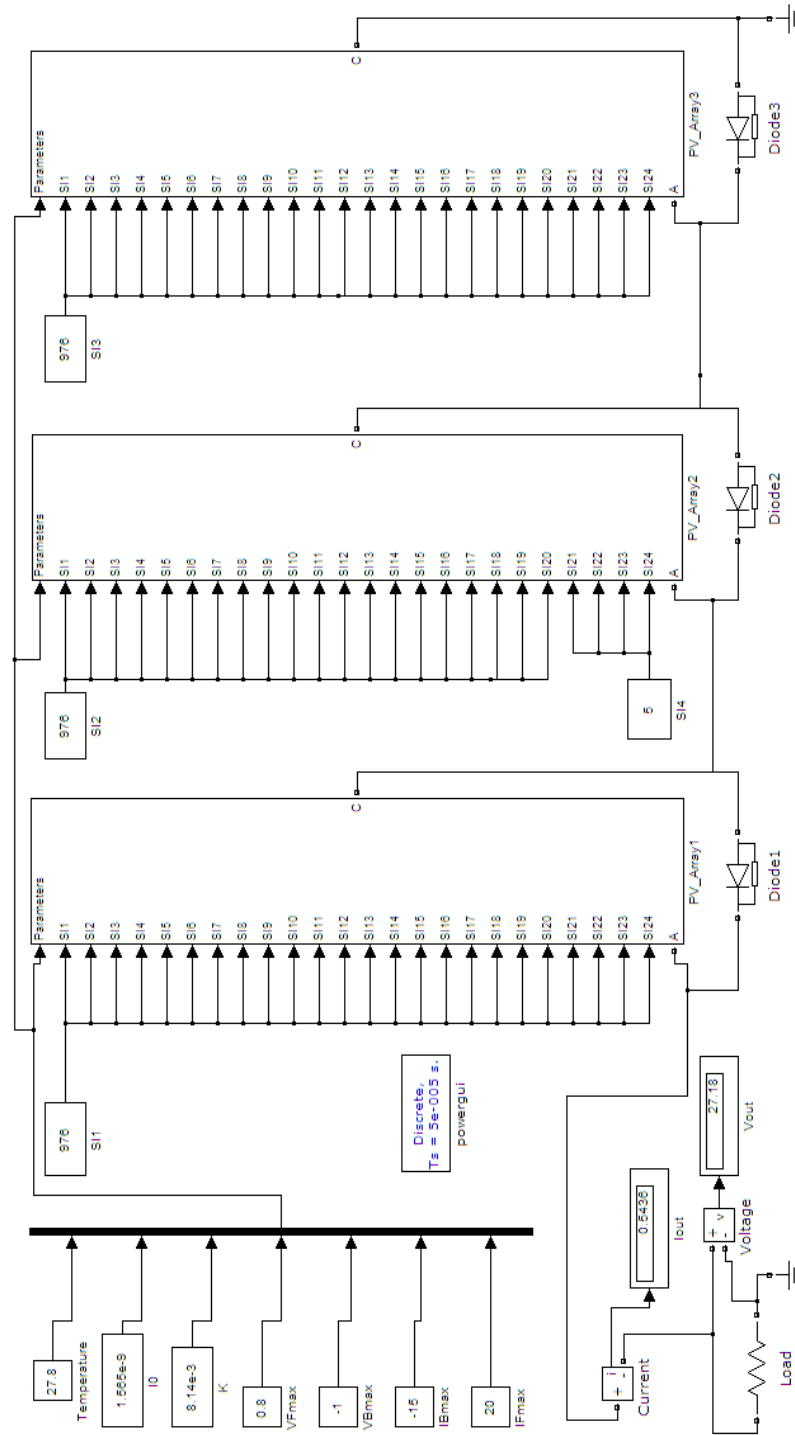


Рис. 3. Simulink-модель фотоэлектрического модуля SF-P672300

Fig. 3. The Simulink model of SF-P672300 PV-module

Параллельно каждому блоку в Simulink-модели подключены обходные диоды в соответствии со схемой на рис. 1а.

Таким образом, модель содержит 72 нелинейных элемента, реализованных на основе управляемых источников тока [13] и соединенных последовательно, что существенно усложняет алгоритм расчета и может привести к возникновению ошибок в алгебраических циклах и невозможности получения результатов.

Для решения этой проблемы введены параметры ограничений по напряжениям и токам при расчете вольт-амперных характеристик [13] (рис. 3, параметры  $VF_{\max}$ ,  $VB_{\max}$ ,  $IF_{\max}$ ,  $IB_{\max}$ ). Также снижены значения параллельных сопротивлений  $R_{sh}$  [13] до 1000 Ом, что не влияет существенно на форму вольт-амперной характеристики модуля, но создает необходимые пути для протекания избыточных токов от последовательно соединенных источников тока.

В примере, показанном на рис. 3, значение солнечного излучения составляет 976 Вт/м<sup>2</sup>, а температура модуля равна 27,8 °С. При нагрузке 50 Ом расчетное значение напряжения, выдаваемого модулем, составило 27,18 В.

### Проверка адекватности Simulink-модели

Для проверки адекватности разработанной Simulink-модели проведены ряд экспериментальных исследований по измерению вольт-амперных характеристик модуля SF-P672300. Условия экспериментов представлены в табл. 1.

Таблица 1

#### Условия проведения экспериментов

##### Experimental tests conditions

| Номер эксперимента | $S$ , Вт/м <sup>2</sup> | $\theta$ , °С | Погодные условия                           | Состояние модуля                                                        |
|--------------------|-------------------------|---------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 1                  | 1105                    | 30,1          | Яркое солнце при рядом находящихся облаках | Чистая поверхность                                                      |
| 2                  | 146,5                   | 22,4          | Солнце закрыто плотными облаками           | Закрыто четыре фотоэлемента в нижней части справа (рис. 4а)             |
| 3                  | 976                     | 27,8          | Яркое солнце                               | Закрыто четыре фотоэлемента в нижней части в центре                     |
| 4                  | 145,4                   | 18,8          | Солнце закрыто плотными облаками           | Закрыто восемь фотоэлементов в нижней части в центре и справа (рис. 4b) |

В процессе исследований модуль располагался близко к нормали по отношению к солнцу. Фотоэлементы закрывались плотной бумагой (рис. 4). Датчик солнечного излучения был прикручен сверху на правой боковой стенке панели (хорошо виден на рис. 4а), датчик температуры – на задней стенке панели. Измерения проводились с помощью прибора SOLAR I-Vw фирмы HT ITALIA, по завершении экспериментов данные были переданы в компьютер. На рис. 5 представлены экспериментальные и расчетные вольт-амперные характеристики, полученные на основе Simulink-модели.

На графиках на рис. 5b–d видны области отпираания обходных диодов в соответствии с рис. 2b.



Рис. 4. Экспериментальная установка:

a – закрыто четыре фотоэлемента; b – закрыто восемь фотоэлементов

Fig. 4. The experimental installation:

a – four PV-cells are closed; b – eight PV-cells are closed

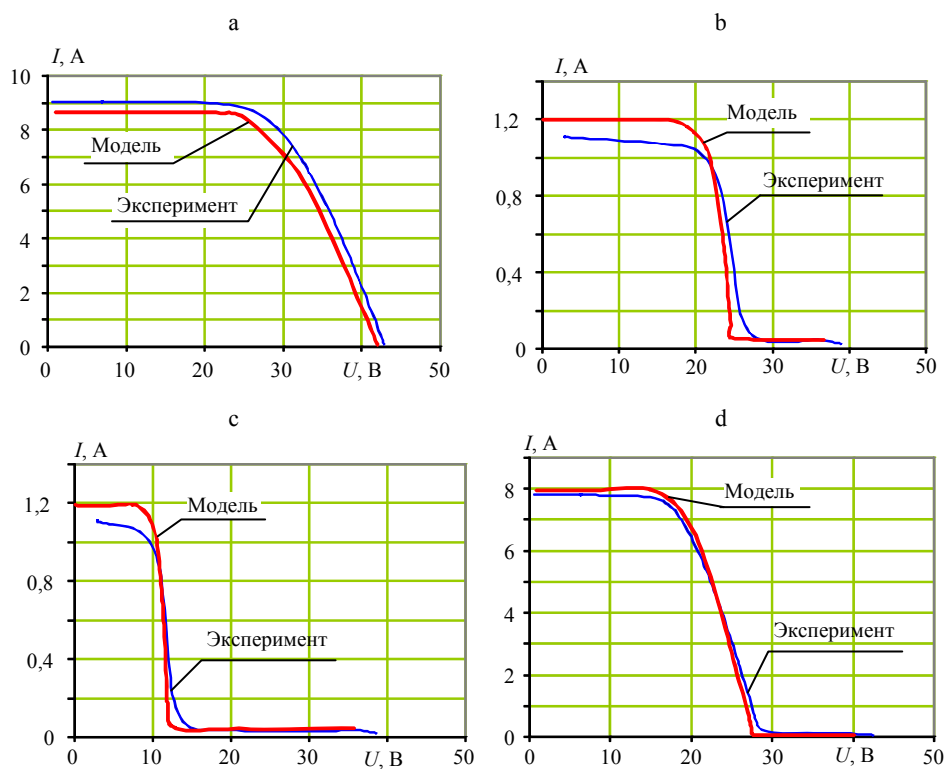


Рис. 5. Экспериментальные и смоделированные вольт-амперные характеристики:

a – опыт № 1; b – № 2; c – № 3; d – опыт № 4

Fig. 5. Experimental and simulated voltage-current characteristics:

a – test 1; b – test 2; c – test 3; d – test 4

Максимальная относительная погрешность разработанной Simulink-модели составила: в опыте № 1 – 4,8 %; № 2 – 10,2 %; № 3 – 10,2 %; в опыте № 4 – 2,9 %. Для практических целей такие погрешности можно признать приемлемыми.

Таким образом, предлагаемая Simulink-модель может быть использована при проектировании и эксплуатации фотоэлектрических станций. На этапе проектирования она позволит изучить особенности поведения станции при различных внешних воздействиях, таких как погодные условия, соседние объекты, растущие деревья и так далее. На этапе эксплуатации модель обеспечит решение задач диагностирования фотоэлектрических модулей, а также облегчит поиск неисправностей, возникающих на станции.

Дальнейшее развитие предложенной Simulink-модели предполагает ее дополнение алгоритмом расчета внутренних температур фотоэлементов на основе их тепловой схемы замещения [15], что позволит повысить точность модели.

## ВЫВОДЫ

1. Существующие Simulink-модели не имеют функции регулирования значения солнечного излучения для каждого фотоэлемента модуля.
2. В Simulink-модели фотоэлектрического модуля должна учитываться вся схема этого модуля, в том числе и обходные диоды.
3. Предлагаемая Simulink-модель фотоэлектрического модуля позволяет имитировать затенение и изменение характеристик любого фотоэлемента модуля.
4. Максимальная погрешность разработанной Simulink-модели по отношению к реальным процессам в фотоэлектрических модулях не превышает 15 %.
5. Представленная Simulink-модель может быть использована на этапе как эксплуатации, так и проектирования фотоэлектростанций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Pandiarajan, N. Mathematical Modeling of Photovoltaic Module with Simulink / N. Pandiarajan, R. Muthu // 1<sup>st</sup> International Conference on Electrical Energy Systems. 2011. P. 314–319. <https://doi.org/10.1109/icees.2011.5725339>.
2. Krismadinata. Photovoltaic Module Modeling Using Simulink/MatLab / Krismadinata, Nasrudin Abd. Rahim, Hew Wooi Ping // Procedia Environmental Sciences. 2013. No 17. P. 537–546. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.069>.
3. Mohammed, S. Sheik. Modeling and Simulation of Photovoltaic Module Using MatLab/Simulink / Sheik S. Mohammed // International Journal of Chemical and Environmental Engineering. 2011. Vol. 2, No 5. P. 350–355.

4. Patel, J. Modeling and Simulation of Solar Photovoltaic Module Using MatLab/Simulink / J. Patel, G. Sharma // *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2013. Vol. 2, No 3. P. 225–228. <https://doi.org/10.15623/ijret.2013.0203003>.
5. Abdulkadir, M. Modeling and Simulation Based Approach of Photovoltaic System in Simulink Model / M. Abdulkadir, A. S. Samosir, A. H. M. Yatim // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2012. Vol. 7, No 5. P. 616–623.
6. Козюков, Д. А. Моделирование характеристик фотоэлектрических модулей в MatLab/Simulink / Д. А. Козюков, Б. К. Цыганков // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2015. Т. 8, № 112. С. 1577–1593.
7. A MatLab-Simulink-Based PV Module Model and its Application under Conditions of Non-uniform Irradiance / Kun Ding [et al.] // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2012. Vol. 27, No 4. P. 864–872. <https://doi.org/10.1109/tec.2012.2216529>.
8. A MatLab/Simulink-Based Photovoltaic Array Model Employing SimPowerSystems Toolbox / S. Said [et al.] // *Journal of Energy and Power Engineering*. 2012. Vol. 6. P. 1965–1975.
9. Maki, A. Power Losses in Long String and Parallel-Connected Short Strings of Series-Connected Silicon-Based Photovoltaic Modules Due to Partial Shading Conditions / A. Maki, V. Seppo // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2012. Vol. 27, No 1. P. 173–183. <https://doi.org/10.1109/tec.2011.2175928>.
10. Patel, H. MatLab-Based Modeling to Study the Effects of Partial Shading on PV Array Characteristics / H. Patel, V. Agarwal // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2008. Vol. 23, No 1. P. 302–310. <https://doi.org/10.1109/tec.2007.914308>.
11. Partial Shading of PV System Simulation with Experimental Results / Basim A. Alsayid [et al.] // *Smart Grid and Renewable Energy*. 2013. Vol. 4, No 6. P. 429–435.
12. Modeling and Simulation of Photovoltaic (PV) System During Partial Shading Based on a Two-Diode Model / K. Ishaque [et al.] // *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2011. Vol. 19, No 7. P. 1613–1626. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2011.04.005>.
13. Зализный, Д. И. Модель фотоэлемента для библиотеки SimPowerSystems пакета MatLab/Simulink / Д. И. Зализный // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 2. С. 135–145. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-135-145>.
14. Foster, R. *Solar Energy: Renewable Energy and the Environment* / R. Foster, M. Ghassemi, A. Cota. Boca Raton: CRC Press: Taylor & Francis Group, 2010. 382 p. <https://doi.org/10.1201/9781420075670>.
15. Адаптивная математическая модель тепловых процессов косинусного силового конденсатора / Д. И. Зализный [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 4. С. 301–312. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-4-301-312>.

Поступила 17.06.2020    Подписана в печать 18.08.2020    Опубликована онлайн 30.11.2020

#### REFERENCES

1. Pandiarajan N., Muthu R. (2011) Mathematical Modeling of Photovoltaic Module with Simulink. *ICEES*, 314–319. <https://doi.org/10.1109/icees.2011.5725339>.
2. Krismadinata, Nasrudin Abd. Rahim, Hew Wooi Ping (2013) Photovoltaic Module Modeling Using Simulink/MatLab. *Procedia Environmental Sciences*, 17, 537–546.
3. Mohammed S. Sheik (2011) Modeling and Simulation of Photovoltaic Module Using MatLab/Simulink. *International Journal of Chemical and Environmental Engineering*, 2 (5), 350–355.
4. Patel J., Sharma G. (2013) Modeling and Simulation of Solar Photovoltaic Module Using MatLab/Simulink. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2 (3), 225–228. <https://doi.org/10.15623/ijret.2013.0203003>.

5. Abdulkadir M., Samosir A. S., Yatim A. H. M. (2012) Modeling and Simulation Based Approach of Photovoltaic System in Simulink Model. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7 (5), 616–623.
6. Kozukov D. A., Tsigankov B. K. (2015) Modeling of Photovoltaic Modules Characteristics by Using MatLab/Simulink. *Nauchnyi Zhurnal Kubanskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta = Scientific Journal of KubSAU*, 8 (112), 1577–1593 (in Russian).
7. Ding Kun, Bian XinGao, Liu HaiHao, Peng Tao (2012) MatLab-Simulink-Based PV Module Model and its Application under Conditions of Nonuniform Irradiance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27 (4), 864–872. <https://doi.org/10.1109/tec.2012.2216529>.
8. Said S., Massoud A. M., Benammar M., Ahmed S. (2012) A MatLab/Simulink-Based Photovoltaic Array Model Employing SimPowerSystems Toolbox. *Journal of Energy and Power Engineering*, 6, 1965–1975.
9. Maki A., Seppo V. (2012) Power Losses in Long String and Parallel-Connected Short Strings of Series-Connected Silicon-Based Photovoltaic Modules Due to Partial Shading Conditions. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27 (1), 173–183. <https://doi.org/10.1109/tec.2011.2175928>.
10. Patel H., Agarwal V. (2008) MatLab-Based Modeling to Study the Effects of Partial Shading on PV Array Characteristics. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23 (1), 302–310. <https://doi.org/10.1109/tec.2007.914308>.
11. Alsayid Basim A., Alsadi Samer Y., Jallad Ja'far S., Dradi Muhammad H. (2013) Partial Shading of PV System Simulation with Experimental Results. *Smart Grid and Renewable Energy*, 4 (6), 429–435. <https://doi.org/10.4236/sgre.2013.46049>.
12. Ishaque K., Salam Z., Taheri H., Syafaruddin (2011) Modeling and Simulation of Photovoltaic (PV) System During Partial Shading Based on a Two-Diode Model. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19 (7), 1613–1626. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2011.04.005>.
13. Zalizny D. I. (2019) Model of a Photovoltaic Cell for the MatLab/Simulink SimPowerSystems Library. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 135–145. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-135-145> (in Russian).
14. Foster R., Ghassemi M., Cota A. (2010) *Solar Energy: Renewable Energy and the Environment*. Boca Raton, CRC Press, Taylor & Francis Group. 382. <https://doi.org/10.1201/9781420075670>.
15. Zalizny D. I., Shirokov O. G., Shirokov G. O., Kapanskiy A. A. (2016) Adaptive Mathematical Model of Thermal Processes in a Cosine Power Capacitor. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (4), 301–312. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-4-301-312> (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-526-540>

УДК 532.5+621.181.7

## Комбинированное сжигание потоков различных промышленных отходов в топках котлов

Часть 2

Ю. П. Ярмольчик<sup>1)</sup>, Р. Шрёгер<sup>2)</sup>, Х. Хаберфельнер<sup>2)</sup>, М. Пихлер<sup>2)</sup>,  
Д. Костич<sup>2)</sup>, Г. В. Мороз<sup>3)</sup>

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

<sup>2)</sup>Компания DUMAG GmbH (Гумпольдскирхен, Австрийская Республика),

<sup>3)</sup>РУП «Белнипиэнергопром» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020  
Belarusian National Technical University, 2020

**Реферат.** При сжигании потоков промышленных отходов (смеси разных веществ) в камерах сгорания теплогенерирующих установок образуется тепловая энергия. При этом энергетический вклад химических соединений, входящих в их состав, различен. В статье рассмотрены энтальпии сгорания наиболее характерных химических веществ, составлены уравнения энергетического баланса при одновременном сжигании нескольких массовых потоков топлива с учетом их теплотворной способности. Исследованы общие механизмы теплопередачи к стенкам камеры сгорания. Приведен анализ вклада конвекции и излучения в общее количество теплоты, переданной теплогенератору, в зависимости от температуры процесса. Показано, что теплообмен излучением между камерой сгорания и трубами котла зависит от тепловых радиационных свойств отложения золы. При этом излучательная способность образовавшегося отложения золы уменьшается с повышением температуры. Рассмотрена зависимость максимального излучения пламени от соотношения массового содержания углерода и водорода (C/H) в топливе на примере исходных горючих химических веществ, входящих в состав твердых, жидких и газообразных отходов промышленных технологий. Определены основные загрязняющие вещества при сгорании промышленных отходов. Подробно проанализированы механизмы образования оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ), твердых частиц, оксидов серы ( $\text{SO}_x$ ), галогеновых кислот, полимеров, сажи, летучих органических соединений и золы. Исследовано распределение различных процессов формирования оксидов азота в зависимости от величины, обратной коэффициенту избытка воздуха ( $\phi = 1/\alpha$ ). Приводится физическая схема и система химических уравнений механизма образования сажи, включающая наиболее важные этапы формирования полициклических ароматических углеводородов. Рассмотрены стадии выделения реактивных золообразующих элементов. Показано, что золные отложения создают серьезные проблемы при эксплуатации теплогенераторов, особенно с такой развитой поверхностью теплообмена, как котельные установки. В связи с этим также уделено внимание формам и условиям протекания процессов осаждения золы.

---

### Адрес для переписки

Ярмольчик Юрий Петрович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-92-16  
[dr.yury.yarmolchick@gmail.com](mailto:dr.yury.yarmolchick@gmail.com)

### Address for correspondence

Yarmolchick Yuriy P.  
Belarusian National Technical University  
65/2, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-92-16  
[dr.yury.yarmolchick@gmail.com](mailto:dr.yury.yarmolchick@gmail.com)

---

Определены условия сгорания, влияющие на состояние, размер и распределение твердых частиц и конденсированной фазы золы.

**Ключевые слова:** энтальпия сгорания, теплопередача, излучение, загрязняющие вещества, оксиды азота, полимеры, летучие органические соединения, сажа, зольные отложения

**Для цитирования:** Комбинированное сжигание потоков различных промышленных отходов в топках котлов. Часть 2 / Ю. П. Ярмольчик [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 6. С. 526–540. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-526-540>

## Combined Combustion of Various Industrial Waste Flows in Boiler Furnaces

Part 2

Yu. P. Yarmolchick<sup>1)</sup>, R. Schröger<sup>2)</sup>, H. Haberfelner<sup>2)</sup>, M. Pichler<sup>2)</sup>,  
D. Kostić<sup>2)</sup>, G. V. Moroz<sup>3)</sup>

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

<sup>2)</sup>DUMAG GmbH (Gumpoldskirchen, Republic of Austria),

<sup>3)</sup>RUE “Belniptenergoprom” (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** When industrial waste flows (mixtures of different substances) are burned, thermal energy is generated in the combustion chambers of the heat generating plants. In this case, the energy contribution of the chemical compounds included in their composition is different. The article considers the enthalpies of combustion of the most characteristic chemicals, formulates the energy balance equations while simultaneously burning several mass flows of fuels, taking into account their calorific value. The general mechanisms of heat transfer to the walls of the combustion chamber are investigated. An analysis is made of the contribution of convection and the radiation mechanism to the total amount of heat transferred to the heat generator, depending on the process temperature. It is demonstrated that the heat transfer by radiation between the combustion chamber and the boiler tubes depends on the thermal radiation properties of ash deposition. In this case, the emissivity of the resulting ash deposition decreases with increasing temperature. The dependence of the maximum flame radiation on the C/H ratio by weight is considered using the example of the initial combustible chemicals that are part of solid, liquid and gaseous wastes of industrial technologies. The main pollutants which emerge during the combustion of industrial waste are determined. The mechanisms of formation of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), particulate matter, sulfur oxides (SO<sub>x</sub>), halogen acids, polymers, soot, volatile organic compounds and ash are considered in detail. The distribution of various processes of formation of nitrogen oxides depending on the value inverse to the coefficient of excess air ( $\varphi = 1/\alpha$ ) is determined. A physical scheme and a system of chemical equations of the mechanism of soot formation which includes the most important stages of the formation of polycyclic aromatic hydrocarbons are presented. The stages of the separation of reactive ash-forming elements are considered. It is demonstrated that ash deposits pose serious problems in the operation of heat generators, especially those that have such a developed heat exchange surface, such as boiler plants. In this regard, the forms and conditions of the processes of ash deposition are also considered separately. The combustion conditions affecting the state, size and distribution of solid particles and the condensed phase of ash are determined.

**Keywords:** combustion enthalpy, heat transfer, radiation, pollutants, nitrogen oxides, polymers, volatile organic compounds, soot, ash deposits

**For citation:** Yarmolchick Yu. P., Schröger R., Haberfelner H., Pichler M., Kostić D., Moroz G. V. (2020) Combined Combustion of Various Industrial Waste Flows in Boiler Furnaces. Part 2. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (6), 526–540. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-526-540> (in Russian)

### Генерация тепловой энергии при горении

Горение определяется как энергетическое эволюционное (экзотермическое) химическое превращение, обычно происходящее в результате большого количества этапов элементарных химических реакций, которые могут индивидуально быть экзотермическими или эндотермическими, но вместе дают такой общий эффект, что энергия химических связей исходного реагента – топлива – выделяется в виде теплоты.

Таким образом, может быть определена стандартная энтальпия сгорания (энтальпия реакции превращения из чистых элементов в их наиболее стабильном состоянии при определенных условиях) для каждого соединения, присутствующего в уравнении горения. Если результирующая температура пламени и дымовых газов очень высокая, дополнительно к нормальным продуктам сгорания появляются и некоторые другие, например композиции  $\text{NO}_x$  [1]. Самая важная из этих реакций – образование теплового NO по механизму Зельдовича [2], что проявляется в основном посредством следующей реакции:



В практических системах сгорания энергетический баланс вычисляется с использованием нижней теплотворной способности топлива, а также теплостойкости топлива, окислителя и дымовых газов. При таком подходе реакция преобразования имеет вид

$$m_B H_{U,B} + m_B c_{pB} (T_B - T_U) + m_L c_{pL} (T_L - T_U) = c_{pm} m_{RG} \Delta T_{RG}, \quad (2)$$

где  $m_B$ ,  $m_L$ ,  $m_{RG}$  – массовые потоки топлива, воздуха и дымовых газов соответственно;  $H_{U,B}$  – низшая теплота сгорания ( $Q_p^H$ ) топлива;  $c_{pB}$ ,  $c_{pL}$ ,  $c_{pm}$  – удельные теплоемкости топлива, воздуха и дымовых газов соответственно;  $T_B$ ,  $T_L$ ,  $T_{RG}$  – температуры топлива, воздуха и дымовых газов соответственно;  $T_U$  – температура окружающей среды.

### Теплопередача

Важность каждого из механизмов теплопередачи зависит от рабочей температуры [3]. Как видно из рис. 1, при температуре ниже  $\sim 600^\circ\text{C}$  конвективный тепловой поток является доминирующим. Для высокотемпературных процессов, в том числе горения, температура газа обычно выше  $1000^\circ\text{C}$  и излучение составляет большую часть теплопередачи.

Теплопередача излучением между трубами котла и окружающей средой зависит от тепловых радиационных свойств отложения золы. Излучательная способность образовавшегося отложения золы уменьшается с повышением температуры, однако абсолютное значение может изменяться в широких пределах (0,20–0,95).

В системах сжигания топлива общее излучение рассматривается как излучение пламени, излучение дымового газа и излучение стен. При сжига-

нии жидкого топлива пламя может иметь в три-четыре раза большее излучение, чем при сжигании газа, из-за большого количества образующейся в нем сажи, что делает его люминесцентным [4]. Относительное максимальное излучение пламени в камерах сгорания практически прямо пропорционально зависит от значения соотношения массовых долей углерода и водорода (C/H). Как видно из рис. 2, топлива, имеющие в составе продуктов сгорания больше золы, генерируют более интенсивное излучение пламени.

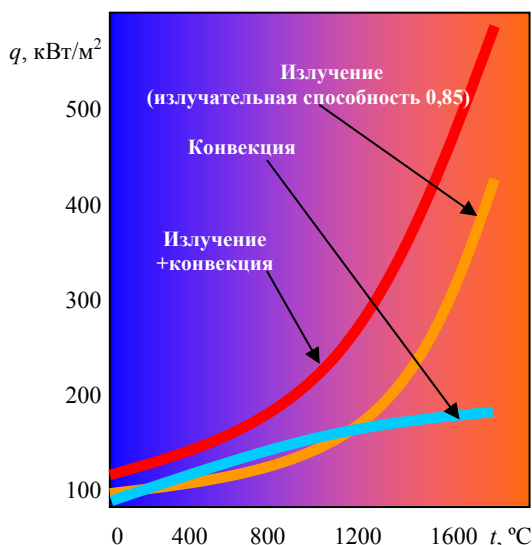


Рис. 1. Тепловой поток при разных температурах (излучательная способность 0,85)

Fig. 1. Heat flux at different temperatures (emissivity of 0.85)

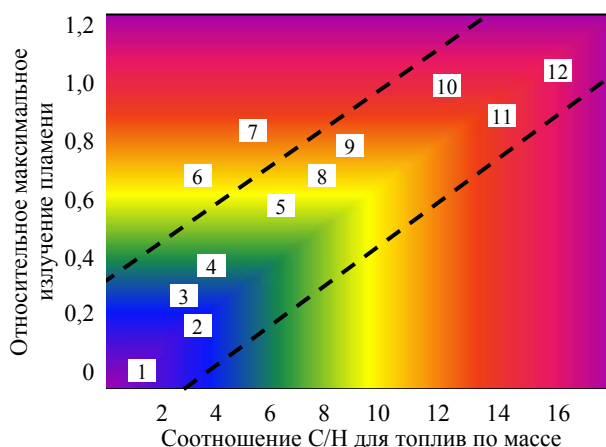


Рис. 2. Зависимость излучения пламени от соотношения C/H:

1 – сжиженный газ; 2 – городской европейский газ; 3 – коксовый газ; 4 – природный газ;  
5 – сырая нефть; 6 – смесь 33 % отработанного масла и 67 % коксового газа; 7 – смесь 67 % отработанного масла и 33 % коксового газа; 8 – мазут; 9 – отработанное масло;  
10 – креозотовое масло; 11 – каменный уголь; 12 – креозотовая смола

Fig. 2. Flame radiation dependency on C/H ratio:

1 – liquefied gas; 2 – town European gas; 3 – coke oven gas; 4 – natural gas; 5 – crude oil;  
6 – 33 % waste oil and 67 % coke oven gas; 7 – 67 % waste oil and 33 % coke oven gas combination; 8 – heavy fuel oil; 9 – waste oil; 10 – creosote oil; 11 – coal fuel; 12 – creosote resin

### Загрязняющие вещества, выделяющиеся при сгорании

На долю процессов сгорания приходится более 95 % выбросов  $\text{CO}_2$  и  $\text{NO}_x$ , около 92 % выбросов  $\text{CO}$ , 85 % выбросов  $\text{SO}_2$  и 40 % выбросов неметановых летучих органических соединений.

Загрязняющие вещества, выделяющиеся в результате горения, принято классифицировать по группам [5]:

- продукты полного сгорания ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ );
- побочные продукты полного сгорания ( $\text{NO}_x$ );
- продукты неполного сгорания ( $\text{CO}$ , сажа, летучие органические соединения (ЛОС), такие как, например, алканы, алкены, алкины, ароматические соединения и альдегиды);
- продукты, происходящие из дополнительных веществ, содержащихся в топливе ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , твердые частицы, тяжелые металлы,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$  и др.).

**Оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ).** К наиболее важным газообразным загрязняющим веществам, выделяющимся в результате процессов горения, относятся оксиды азота ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ) [6].

Различают следующие механизмы формирования оксидов азота [7]:

- тепловые  $\text{NO}$  (механизм Зельдовича): высокие температуры в близких к стехиометрическим условиям;
- быстрые  $\text{NO}$  (механизм Фенимора): богатая топливом смесь;
- $\text{N}_2\text{O}$ -механизм: условия обедненной топливом смеси при повышенном давлении;
- $\text{NNH}$ -механизм: условия обедненной топливом смеси;
- преобразование связанного с топливом азота: топливо, содержащее атомы азота.

При высоких температурах доминирующим источником  $\text{NO}_x$  является выделяемая при горении теплота, но при более низких температурах преобладают механизмы топливного азота. Соотношение «воздух – топливо» также существенно влияет на распределение различных процессов образования оксидов азота. Области формирования  $\text{NO}$  по известным механизмам в зависимости от величины, обратной коэффициенту избытка воздуха ( $\phi = 1/\alpha$ ), показаны на рис. 3.

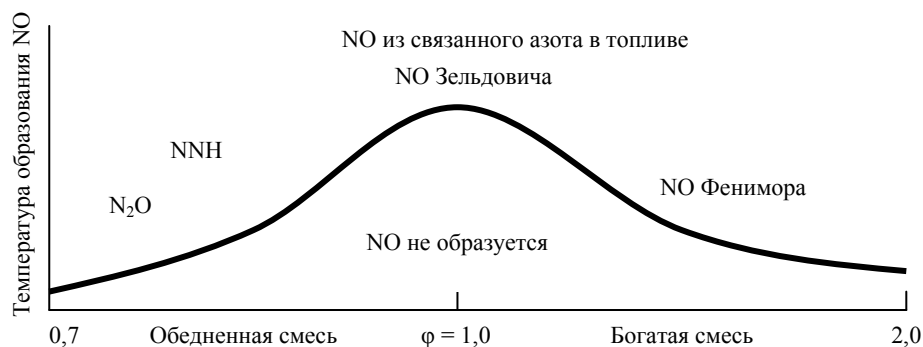
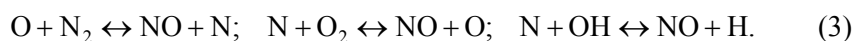


Рис. 3. Области формирования  $\text{NO}$

Fig. 3.  $\text{NO}$  formation areas

Тепловые NO начинают образовываться при  $\sim(1200\text{--}1300)^\circ\text{C}$ , и с дальнейшим повышением температуры их формирование быстро увеличивается. Кроме того, появление NO интенсифицируется с увеличением избытка кислорода и времени пребывания топливовоздушной смеси в зоне с высокой температурой. Быстрые же NO обычно составляют лишь ограниченную долю общего количества оксидов азота [7].

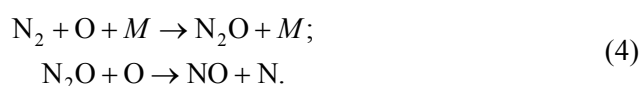
Тепловой механизм образования NO состоит из следующих реакций (называемых механизмом Зельдовича):



Экспериментальные измерения теплового образования  $\text{NO}_x$  показали, что его концентрация экспоненциально зависит от температуры и пропорциональна концентрации  $\text{N}_2$  и квадратному корню концентрации  $\text{O}_2$  непосредственно в пламени, а также времени пребывания этих молекул в области горения. Таким образом, на возникновение теплового  $\text{NO}_x$  в основном влияют четыре фактора: пиковая температура; концентрация азота в топливе; концентрация кислорода; время пребывания  $\text{N}_2$  и  $\text{O}_2$  при пиковой температуре.

Если температура сгорания снижается в условиях обедненной топливовоздушной смеси ( $\alpha > 1,5$ ), образование теплового NO резко снижается. Но общее количество NO значительно превышает концентрацию NO, полученную с помощью механизма Зельдовича. Причина в том, что при высоком избытке кислорода появляется  $\text{N}_2\text{O}$ , а затем снова происходит деление на две молекулы NO.

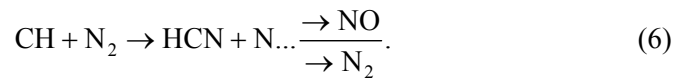
Механизм закиси азота (образования  $\text{N}_2\text{O}$ ) подобен тепловому механизму в том, что атомы кислорода атакуют молекулярный азот. Однако в присутствии третьей молекулы  $M$  результатом этой реакции является формирование  $\text{N}_2\text{O}$  [8]:



Обычно небольшая, но при некоторых условиях значительная часть NO образуется через механизм NNH. Радикал NNH появляется в результате реакции  $\text{N}_2$  из воздуха с H с дальнейшим окислением до NO



В условиях богатой топливовоздушной смеси ( $0,6 < \alpha < 1$ ), когда тепловой механизм образования NO дает довольно низкие значения, имеет место альтернативная реакция, в основном обусловленная присутствием СН-радикала. Быстрый механизм образования NO характеризуется тем, что азот воздуха фиксируется углеводородными радикалами, а HCN впоследствии окисляется до NO. Такой путь образования NO называется механизмом Фенимора:



На рис. 4 показано образование NO (в ppm – parts per million – массовых частях на миллион) в камере сгорания с перемешиванием (сжигание метана) [9]:

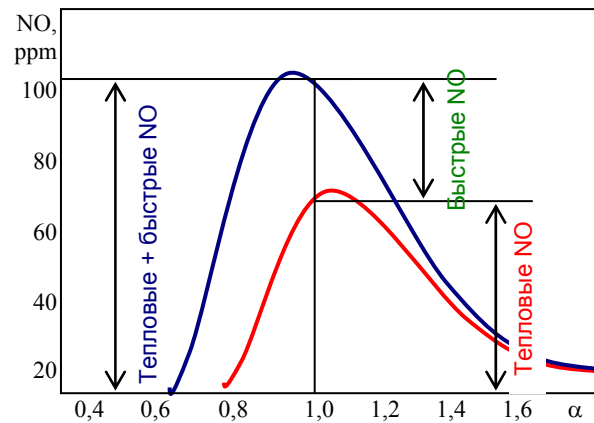
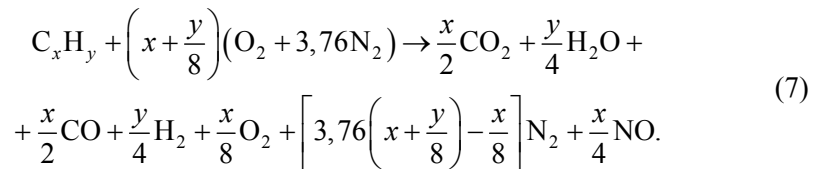


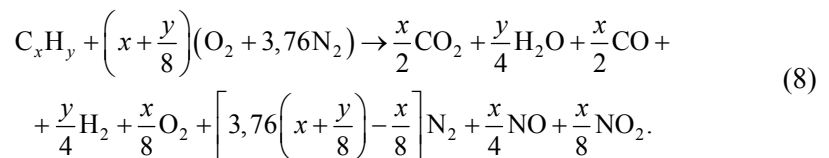
Рис. 4. Тепловые и быстрые NO

Fig. 4. Thermal and prompt NO

Условие равновесия для различного отношения воздух/топливо (в зависимости от вида топлива), включая реакции образования NO:



Этот тип реакции происходит в камере сгорания, в которой соотношение воздуха к топливу ниже стехиометрического. Температура реакции составляет ~1200 K, но не более 1600 K, при этом около 50 % азота, присутствующего в воздухе, превращается в оксид азота (NO), а оставшиеся 50 % выделяются в виде свободного азота (N<sub>2</sub>). Для температур сгорания более 1600 K в дополнение к NO непосредственно в зоне горения образуется также NO<sub>2</sub>. В этом случае уравнение можно записать в виде



Ископаемые виды топлива обычно содержат органические азотные соединения. Содержание азота составляет: ~0,8–1,5 % – для угля; ~0,1–0,6 % – для нефтепродуктов. В процессе сжигания происходит частичное окисление

азотсодержащего топлива. При средних условиях окисляется ~20–40 % азота в угле, ~60–70 % – в тяжелых нефтепродуктах (мазутах) и ~80–90 % – в легких нефтепродуктах (дизель, керосин, бензин). Образование топливного NO в основном зависит от избытка кислорода, тогда как температура оказывает незначительное влияние [10]. В условиях обедненной топливовоздушной смеси ( $\alpha > 1$ ) около двух третей топливного азота окисляется с образованием NO. Остальное конвертируется в  $N_2$ . В условиях богатой топливом смеси ( $\alpha < 1$ ) количество образующегося NO уменьшается, но появляются другие продукты, такие как HCN (синильная кислота) и  $NH_3$  (аммиак), которые позднее окисляются до NO (и далее до  $NO_2$ ) в атмосфере. Ключевым фактором является то, что сумма загрязняющих веществ имеет минимум при  $\alpha = 0,6–0,75$  (или  $\phi = 1,35–1,65$ ). При таких условиях конверсия связанного с топливом азота в молекулярный азот ( $N_2$ ) имеет максимум.

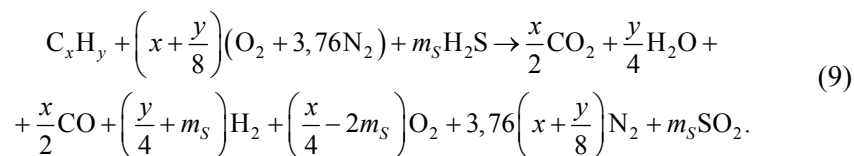
**Твердые частицы.** Существуют четыре класса частиц, которые формируются из газовых или парообразных прекурсоров в системах сжигания:

- неорганические частицы, образующиеся при высоких температурах (зола);
- $H_2SO_4$ , появляющаяся при температуре уходящих газов;
- сажа, полученная при высоких температурах;
- конденсируемые органические частицы, образующиеся при температуре уходящих газов.

Три из них – частицы неорганического пепла, капли  $H_2SO_4$  и конденсирующаяся органика – включают гомогенное или гетерогенное зарождение твердых частиц. Общее количество конденсации для этих трех категорий четко определено и приблизительно равно количеству первоначально испаренного материала, которое превышает равновесие при температуре окружающей среды. Для сажи и стадия зарождения частиц, и ее количество определяются детальной кинетикой, а не термодинамическим равновесием.

**Оксид серы.** Многие промышленные отходы и ископаемое топливо содержат серу. Она может присутствовать в любом или во всех своих состояниях окисления от  $S_{-2}$  до  $S_{+6}$ . С точки зрения загрязнения воздуха особый интерес представляет сера, появляющаяся в виде органической или неорганической (пиритной) серы, свободной серы или серы в форме органических или неорганических кислот. Можно ожидать, что в каждом из этих случаев сера будет появляться в топливных газах в виде диоксида или триоксида серы.

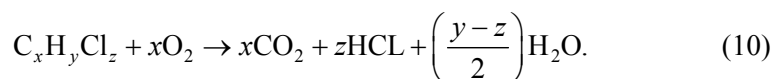
Если включить в глобальную формулу сгорания условия богатой топливовоздушной смеси ( $\alpha < 1$ ), то получим образование диоксида серы по следующей схеме:



Распределение серы между диоксидной и триоксидной формами зависит от ее химического состава в топливе, графика изменения температуры во времени и состава дымовых газов, а также от наличия или отсутствия каталитической золы. Хотя холодное окончание химического равновесия и избыточные концентрации кислорода способствуют окислению до триоксида, скорость реакции медленная и, как правило, только ~2–4 % серы окисляется до триоксида. В области горения триоксид серы реагирует с водяным паром с образованием серной кислоты, у которой точка росы значительно выше, чем у чистой воды.

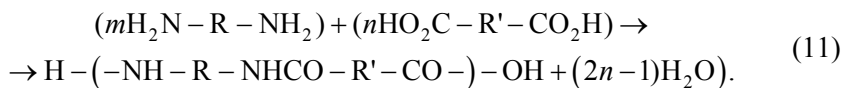
**Галогеновые кислоты.** Некоторые из органических соединений галогенов оказывают токсичное, канцерогенное или иное опасное влияние на здоровье. Кроме того, кислые газы, образующиеся во время сгорания, являются сильными кислотами, которые могут воздействовать на металлы (например, в котлах) и очень коррозионны в водных растворах в скрубберах. Хлор и соляная кислота, как правило, относятся к числу самых важных членов этого семейства, хотя фтор, бром, йод и их кислоты могут создавать более серьезные проблемы при расчете и проектировании системы сгорания, ее эксплуатации и организации контроля над загрязняющими веществами.

Принципиальная формула реакции сжигания углеводородов, содержащих наиболее распространенный галоген (хлорид):



Хлорированные соединения также оказывают комплексное воздействие на образование NO из-за взаимодействия ряда реакционных процессов. Они могут уменьшить образование тепловых NO, но увеличить концентрацию быстрых NO [5].

**Полимеры.** Полимеры классифицируются на конденсационные и аддитивные. Конденсационные полимеры формируются из полифункциональных мономеров различными реакциями конденсации органической химии с удалением некоторой малой молекулы, такой, например, как вода. Примером конденсационных полимеров являются полиамиды, образованные из диаминов и дикислот с удалением воды:



Такая форма полимеризации в процессах сжигания отходов распространена, поскольку в них часто присутствуют ненасыщенные углеводороды и различные кислоты, которые могут реагировать с полимерами.

Аддитивные полимеры образуются из неомеров без потери малой молекулы. В отличие от конденсационных полимеров, повторяющееся звено аддитивного полимера имеет тот же состав, что и мономер. Основные аддитивные полимеры появляются при полимеризации мономеров, содержа-

щих двойную связь «углерод – углерод». Обычным примером аддитивной полимеризации является полимеризация поливинилхлорида.

**Сажа** состоит из сферических наночастиц элементарного углерода (первичных частиц) с диаметром в диапазоне от 5 до 100 нм. Такие наночастицы генерируются путем коагуляции, роста поверхности, окисления и коалесценции прекурсоров частиц размером менее 3–5 нм. Сажа формируется в богатых топливом условиях, в которых углеводородные фрагменты имеют большую вероятность столкновения друг с другом и роста, а не окисляются до  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . В состоянии равновесия она существует, когда  $\text{C/O}$  превышает 1,0. В диффузионном пламени сажа образуется даже при избытке воздуха, поскольку дефицит кислорода всегда будет обнаруживаться на топливной стороне фронта пламени.

Образование сажи – это сложный химический процесс, в котором участвует большое количество различных веществ, таких как ацетилен, бензол и полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Поскольку ПАУ являются прекурсорами сажи, базовое понимание механизма ее формирования должно начинаться с понимания механизма возникновения ПАУ. Известно, что ацетилен образуется в больших концентрациях при сжигании, обогащенном топливом, и его полимеризация ведет к формированию ПАУ [3]. Оно начинается либо с разложения  $\text{C}_3\text{H}_4$ , либо с реакции  $\text{CH}$  или  $\text{CH}_2$  с  $\text{C}_2\text{H}_2$  до  $\text{C}_3\text{H}_3$ , который может образовывать первое кольцо (бензол  $\text{C}_6\text{H}_6$ ).

Глобально формирование частиц сажи можно разделить на два этапа (рис. 5): молекулярные реакции (молекулярная зона); физические процессы роста частиц (партикулярная зона).



Рис. 5. Схема формирования сажи

Fig. 5. The schematic of soot formation

Приведенная на рис. 5 качественная картина формирования сажи показывает различные процессы, приводящие к образованию окончательно конгломерата ее частиц. Эти процессы можно обобщить следующим образом:

- расщепление молекул топлива до мелких углеводородных радикалов;
- образование более крупных углеводородов (углеводородных радикалов) и ароматических структур в условиях богатой топливом смеси;

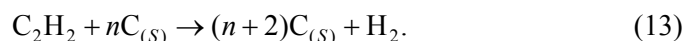
- формирование первичных частиц сажи (зарождение частиц) – нуклеация;
- поверхностные реакции роста частиц сажи – коалесценция;
- добавление крупных (ароматических) молекул на поверхность частиц сажи – аддитация;
- коагуляция частиц сажи в агломераты и далее в конгломераты на поверхностях.

Первый из приведенных этапов очень тесно связан с процессом полимеризации, который может происходить во время сжигания отходов без реализации дальнейших этапов.

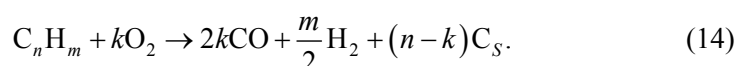
Для упрощения описания механизма формирования сажи [11] его можно разбить на два основных этапа с несколькими допущениями. Первый этап – появление зарождающихся частиц (нуклеация). Хорошо известно, что образование сажи сопровождается присутствием ацетиленов (полиацетиленов) и ароматических (полиароматических) кольцевых структур. Показательным видом для этого процесса является ацетилен. Тогда глобальную реакцию преобразования ацетилена в сажу можно записать



Второй реакцией, ответственной за образование сажи, является рост поверхности за счет адсорбции  $\text{C}_2\text{H}_2$  на поверхности частиц. Эта стадия может быть схематически записана как



Общую формулу сгорания углеводородов в богатых топливом смесях можно описать формальной идеализированной реакцией



Уравнение (14) представляет идеализированный случай без образования  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ . Это указывает на то, что твердый углерод появляется, когда соотношение  $\text{C}/\text{O} > 1$ .

В атмосферных системах сгорания основными инструментами, защищающими от появления сажи и смога, являются высокая температура, длительное время пребывания в зоне горения и развитая турбулентность [12]. Иными словами, если обеспечить более длительное время пребывания частиц в высокотемпературной зоне при хорошем перемешивании, то можно гарантировать окисление сажи [5]. К сожалению, эти условия также могут привести к более высокому образованию  $\text{NO}_x$ .

**Летучие органические соединения (ЛОС)** представляют собой любые органические соединения, которые после попадания в атмосферу могут оставаться в ней в течение достаточно длительного времени, чтобы участвовать в фотохимических реакциях. Важным параметром в процедурах оценки качества воздуха является не только общее количество выделяе-

мых ЛОС, но и их конкретный состав [6]. Например, стационарные поршневые двигатели большого диаметра, работающие на сжиженном природном газе, будут содержать некоторое количество метана в выхлопе. Но они также выделяют формальдегид и ароматические соединения, такие как бензол, толуол и ксилол, которые очень вредны для окружающей среды. Поэтому представляет интерес, как они генерируются и почему не уничтожаются в результате пламенного горения.

В общем, несгоревшие углеводороды являются следствием локального затухания пламени. Различают два эффекта: затухание пламени деформацией и затухание пламени у стен и в щелях. Объяснение этих эффектов подробно рассматривается, например, в [2].

**Зола.** Основная форма твердых частиц – неорганические мелкодисперсные тела. Общее количество взвешенных частиц представляет собой преимущественно относительно инертную золу: смесь неопасных соединений, в основном состоящую из кремния, алюминия, кальция, железа и кислорода. Однако долю выбросов при сгорании отходов составляют и тяжелые металлы: свинец, ртуть, кадмий, мышьяк и другие элементы, которые могут оказывать значительное токсическое, канцерогенное и иное воздействие на здоровье.

Когда топливо сгорает, выделяющиеся из него золообразующие элементы проходят различные пути реакции. После попадания в камеру сгорания частицы топлива быстро нагреваются и высыхают. После этого начинается пиролиз, т. е. органические летучие вещества высвобождаются из топлива и сгорают видимым пламенем. На этой стадии вместе с газами выделяются некоторые реактивные золообразующие элементы. С этого момента и далее начинается горение кокса.

Первичные частицы золы состоят из неорганических или органических частиц либо их комбинации. Аэрозоли горения являются мультимодальными. Самые мелкие частицы появляются в результате превращения газа в частицы и образуют нуклеи (ядра) или наночастицы. Они растут путем коагуляции и увеличения поверхности в режиме накопления. Более крупные сверхмикронные частицы образуются из неорганического материала, поступающего в твердой или жидкой фазе с топливом, и называются остаточной золой твердых частиц [9].

Для понимания формирования ПАУ при сгорании важно знание элементарных реакций, образующих первое ароматическое кольцо. Эти реакции являются объектами детального изучения. Обобщенная схема образования летучей и подовой золы показана на рис. 6.

Формирование твердого осадка можно представить четырьмя наиболее важными этапами: образование золы; перенос частиц золы или золообразующего состава на поверхность; адгезия частиц золы к поверхности; консолидация осадка.

Способность частиц золы прилипать к поверхностям сильно зависит от температуры и физического состояния. Расплав в частице золы действует как прилипающее вещество для всей частицы. С точки зрения липкости

большое значение имеет температура, при которой присутствует достаточное количество расплава, чтобы приклеить частицу золы к поверхности. Температура, при которой 15 % конденсированной фазы, т. е. суммы жидкой и твердой фаз, расплавлено, определяется как критическая температура липкости в отложениях котла-утилизатора.

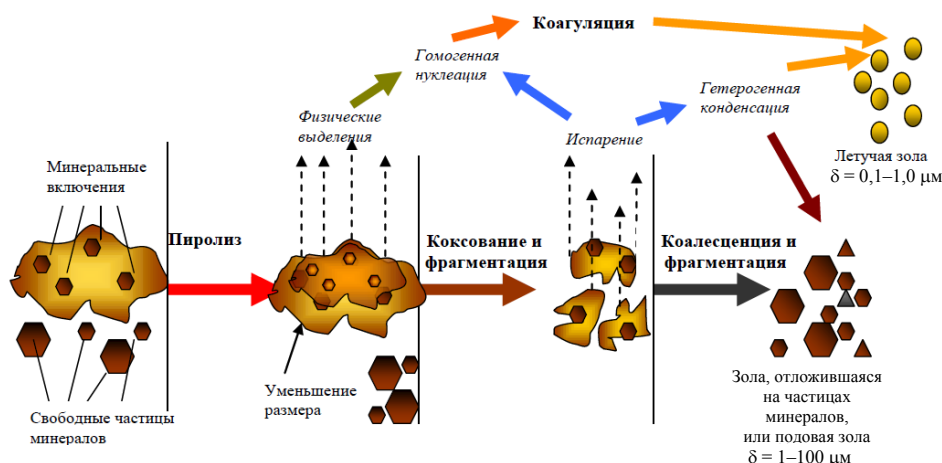


Рис. 6. Схема образования золы  
Fig. 6. The schematic of ash formation

Зольные отложения вызывают особенно серьезные проблемы в котлах. Различают две формы процессов осаждения золы: шлак и загрязнение.

**Шлак** относится к отложениям, образующимся на участках котла, подверженных воздействию в основном лучистой теплоты, таких как стенки камеры сгорания. Шлаковые отложения формируются из частиц расплавленной или наполовину расплавленной золы, которые прилипают к горячим стенкам топки. Они не образуются сразу после запуска котла, а медленно накапливаются после формирования начального слоя на стенках.

Понятие «загрязнение» используется для характеристики отложений, появляющихся на конвективном проходе, например на теплообменных трубах. В этом случае отложения образуются неорганическими парами, которые конденсируются на относительно более холодных поверхностях труб теплообменника.

Хотя механизмы формирования шлака и загрязнения не одинаковы, оба тесно связаны с тенденцией компонентов топливной золы плавиться или испаряться при низких температурах.

Условия сгорания, такие как температура и атмосфера, влияют на летучесть и взаимодействие неорганических компонентов при сгорании и охлаждении газа, что, в свою очередь, определяет состояние, размер и распределение твердых частиц и конденсированной фазы золы. Промежуточные частицы транспортируются с газовым потоком через систему сгорания, в течение этого времени газы и захваченная зола охлаждаются. Осаждение, коррозия и эрозия происходят, когда промежуточные частицы

золы транспортируются на поверхность теплопередачи, реагируют с поверхностью, накапливаются на ней, спекаются и уплотняются.

Вследствие важности температуры плавления золы прогнозирование начала шлакообразования (расплавления золы) и загрязнения (накопления расплавленных отложений) было и остается актуальной проблемой для технологов по топливу. Поскольку зола содержит семь основных и множество второстепенных составляющих в нескольких сотнях различных минеральных составов и кристаллических форм, анализ проблемы отложений и разработка надежных инструментов прогнозирования затруднены. Следовательно, начальная температура деформации при определении температуры плавления золы является ориентиром при установлении верхнего предела рабочей температуры.

#### ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ механизмов теплопередачи в топке котла при одновременном сжигании нескольких потоков промышленных отходов показывает, что при температурах процесса ниже 600 °C основной вклад вносит конвекция, а при температурах выше 1200 °C – радиационный теплообмен.

2. Определена зависимость максимального излучения в топке котла для различных топлив от значения соотношения массовых долей углерода и водорода (C/H).

3. Выделены основные загрязняющие вещества при сгорании промышленных отходов и определены механизмы, схемы реакций и этапы их образования в зависимости от химического состава топлив, температуры процесса и коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ .

4. Показано, что способность частиц золы прилипать к поверхностям устройств теплообмена сильно зависит от температуры и физического состояния. Расплав в частице золы действует как прилипающее вещество для всей частицы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гламаздин, П. М. Экологические аспекты модернизации водогрейных котлов большой мощности / П. М. Гламаздин, Д. П. Гламаздин, Ю. П. Ярмольчик // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 3. С. 249–259. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-3-249-259>.
2. Зельдович, Я. Б. Окисление азота при горении / Я. Б. Зельдович, П. Я. Садовников, Д. А. Франк-Каменецкий. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1947. 148 с.
3. Industrial Furnaces / W. Trinks [et al.]. 6<sup>th</sup> ed. Hoboken, New Jersey: Jon Wiley & Sons, 2004. 496 p. <https://doi.org/10.1002/9780470172612>.
4. Charles, E. The John Zink Hamworthy Combustion Handbook. Vol. 1. Fundamentals / E. Charles, Jr. Baukal. Boca Roca: Taylor & Francis Group, 2013. 651 p. <https://doi.org/10.1201/b15101>.
5. Pollutants from Combustion: Formation and Impact on Atmospheric Chemistry / ed. Ch. Vovellet. Dordrecht: Springer, 2000.
6. Turns, S. R. An Introduction to Combustion: Concepts and Applications / S. R. Turns. 3<sup>rd</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 2000. 676 p.
7. Ярмольчик, Ю. П. Механизмы образования и методика расчета выбросов загрязняющих веществ при сжигании природного газа в зависимости от эмиссионного класса горелок / Ю. П. Ярмольчик // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 6. С. 565–582. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-565-582>.

8. Warnatz, J. *Verbrennung*. 2. Auflage / J. Warnatz, U. Maas, R. Dibble. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1997. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-97947-7>.
9. Joos, F. *Technische Verbrennung* / F. Joos. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. <https://doi.org/10.1007/3-540-34334-2>.
10. Комбинированное сжигание потоков различных промышленных отходов в топках котлов. Часть 1 / Ю. П. Ярмольчик [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 3. С. 236–252. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-236-252>.
11. AP42-Compilation of Air Pollution Emission Factors / Environmental Protection Agency. 1995. Vol. 1.
12. Есьман, Р. И. Анализ процессов горения в турбулентных смешивающихся осевых и тангенциальных потоках / Р. И. Есьман, Ю. П. Ярмольчик // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2009. № 2. С. 47–52.

Поступила 16.06.2020 Подписана в печать 18.08.2020 Опубликовано онлайн 30.11.2020

#### REFERENCES

1. Glamazdin P. M., Glamazdin D. P., Yarmolchick Yu. P. (2016) Environmental Aspects of Modernization of High Power Water-Heating Boilers. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (3), 249–259. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-3-249-259> (in Russian).
2. Zeldovich Ya. B., Sadochnikov P. Ya., Frank-Kamenetskiy D. A. (1947) *Oxidation of Nitrogen during Combustion*. Moscow-Leningrad, Academy of Sciences of the USSR Publ. 148 (in Russian).
3. Trinks W., Mawhinney M. H., Shannon R. A., Reed R. J., Garvey J. R. (2004) *Industrial Furnaces*. 6<sup>th</sup> ed. Hoboken, New Jersey: Jon Wiley & Sons. 496. <https://doi.org/10.1002/9780470172612>.
4. Charles E., Baukal Jr. (2013) *The John Zink Hamworthy Combustion Handbook. Vol. 1. Fundamentals*. Bosa Roca, Taylor & Francis Group Publ. 651. <https://doi.org/10.1201/b15101>.
5. Vovelle Ch. (ed.) (2000) *Pollutants from Combustion: Concepts and Applications*. Dordrecht, Springer Publ.
6. Turns S. R. (2000) *An Introduction to Combustion, Concepts and Applications*. 3<sup>rd</sup> ed. New York, McGraw-Hill Publ.
7. Yarmolchick Yu. P. (2019) Formation Mechanisms and Methods for Calculating Pollutant Emissions from Natural Gas Combustion Depending on the Burner Emission Class. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (6), 565–582. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-565-582> (in Russian).
8. Warnatz J., Maas U., Dibble R. (1997) *Verbrennung*. 2. Auflage. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag Publ. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-97947-7>.
9. Joos F. (2006) *Technische Verbrennung*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag Publ. <https://doi.org/10.1007/3-540-34334-2>.
10. Yarmolchick Yu. P., Schröger R., Habermelner H., Pichler M., Kostić D., Moroz G. V. (2020) Combined Combustion of Various Industrial Waste Flows in Boiler Furnaces. Part 1. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (3), 236–252. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-236-252> (in Russian).
11. Environmental Protection Agency (1995) *AP42-Compilation of Air Pollution Emission Factors*. Vol. 1.
12. Esman R. I., Yarmolchick Yu. P. (2009) Analysis of Burning Processes in Turbulent Mixing Axial and Tangential Flows. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (2), 47–52 (in Russian).

Received: 16 June 2020

Accepted: 18 August 2020

Published online: 30 November 2020

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-541-553>

УДК 621.019

## Внутренний бенчмаркинг тепловых электростанций электроэнергетических систем

Э. М. Фархадзаде<sup>1)</sup>, А. З. Мурадалиев<sup>1)</sup>, Ю. З. Фарзалиев<sup>1)</sup>, У. К. Ашурова<sup>1)</sup>

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020  
Belarusian National Technical University, 2020

**Реферат.** Повышение оперативной эффективности работы (ОЭР) тепловых электростанций относится к числу важнейших проблем электроэнергетических систем (ЭЭС). Эффективность работы, согласно современным представлениям, – это одновременный учет трех свойств объектов: экономичности, надежности и безопасности. Методология их совместной оценки предполагает, что срок службы основного оборудования не превышает нормативного значения, однако данному условию сегодня отвечают менее половины производственных предприятий многих ЭЭС. Чтобы повысить ОЭР, необходимо, в первую очередь, научиться объективно сравнивать эффективность работы объектов, как однотипных – в заданном интервале времени, так и уникальных – в смежных интервалах. Существующие методы расчета интегральных показателей эффективности работы недостаточно полно учитывают случайный характер технико-экономических показателей (ТЭП). В статье приводится новый метод сравнения ОЭР объектов ЭЭС, суть которого сводится к переходу от совместного рассмотрения ТЭП к анализу их относительного изменения по сравнению с заводским (номинальным) значением. Относительные значения показателей характеризуют величину износа или остаточного ресурса. При этом, например, среднее арифметическое значение относительных величин ТЭП определяет среднюю величину износа объекта. Такое физическое представление оживляет интегральные показатели, а их сравнение и ранжирование перестает быть наукоёмким. Предлагается учесть и степень разброса относительных отклонений (износа), которая адекватна разрегулировке объекта. Она проявляется в существенном изменении (ухудшении) одного или реже двух относительных значений ТЭП в расчетном интервале времени (месяце) и характеризуется такими статистическими показателями, как среднее геометрическое значение и коэффициент вариации относительных отклонений. Заметим, что если среднее арифметическое значение износа объекта восстанавливается при капитальном ремонте, то разрегулировка устраняется гораздо быстрее – при текущем ремонте. Необходимым условием целесообразности применения тех или иных интегральных показателей является их функциональная и статистическая независимость. Результаты исследований методом имитационного моделирования позволили установить, что наименьшая корреляционная взаимосвязь имеет место между интегральным показателем, вычисляемым как среднее арифметическое значение случайных величин, и интегральным показателем,

---

### Адрес для переписки

Фархадзаде Эльмар Мехтиевич  
Азербайджанский научно-исследовательский  
и проектно-изыскательский институт энергетики  
просп. Г. Зардаби, 94,  
Аз1012, г. Баку, Азербайджанская Республика  
Тел.: +99 412 431-64-07  
elmeht@rambler.ru

### Address for correspondence

Farhadzadeh Elmar M.  
Azerbaijan Scientific-Research and Design-  
Prospecting Power Engineering Institute  
94, G. Zardabi Ave.,  
Az1012, Baku, Republic of Azerbaijan  
Tel.: +99 412 431-64-07  
elmeht@rambler.ru

---

вычисляемым как коэффициент вариации тех же случайных величин. Сопоставление корреляционных полей наглядно подтверждает эти выводы.

**Ключевые слова:** внутренний бенчмаркинг, интегральный показатель, эффективность работы, экономичность, безопасность, метод, риск ошибочного решения

**Для цитирования:** Внутренний бенчмаркинг тепловых электростанций электроэнергетических систем / Э. М. Фархадзаде [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 6. С. 541–553. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-541-553>

## Internal Benchmarking of Thermal Power Plants of Electric Power Systems

E. M. Farhadzadeh<sup>1)</sup>, A. Z. Muradaliyev<sup>1)</sup>, Y. Z. Farzaliyev<sup>1)</sup>, U. K. Ashurova<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Azerbaijan Scientific-Research and Design-Prospecting Power Engineering Institute (Baku, Republic of Azerbaijan)

**Abstract.** Improving the operational efficiency (OE) of thermal power plants is one of the most important problems of electric power systems (EPS). According to modern concepts, efficiency is the simultaneous consideration of three properties of objects, viz. economy, reliability and safety. The methodology of their joint assessment assumes that the service life of the main equipment does not exceed the standard value, but this condition is now met by less than half of the production enterprises of a lot of EPS. In order to increase OE, it is necessary, first of all, to learn how to objectively compare the performance of objects both of the same type – in a given time interval, and unique ones – in adjacent intervals. Existing methods for calculating integrated performance indicators do not fully take into account the random nature of technical and economic indicators (TEI). The article presents a new method for comparing the OE of EPS objects, the essence of which is to switch from joint consideration of TEI to analysis of their relative changes in comparison with the factory default value (nominal value). Relative values of indicators characterize the amount of wear or residual life. In this case, for example, the arithmetic mean of the relative values of the TEI determines the average wear of the object. This physical representation enlivens integral indicators, and their comparison and ranking ceases to be science-intensive. It is proposed to take into account also the degree of variation of relative deviations (wear), which is adequate to the object's misalignment. It manifests itself in a significant change (deterioration) of one or (less often) two relative values of the TEI in the calculated time interval (month) and is characterized by such statistical indicators as the geometric mean and the coefficient of variation of relative deviations. Herewith, if the arithmetic mean value of the object's wear is restored during major repairs, then the misalignment is eliminated much faster – during current repairs. A necessary condition for the feasibility of using these or those integral indicators is their functional and statistical independence. The results of the studies performed using the simulation method made it possible to establish that the smallest correlation occurs between the integral indicator calculated as the arithmetic mean of random variables and the integral indicator calculated as the coefficient of variation of the same random variables. Comparison of correlation fields clearly confirms these conclusions.

**Keywords:** internal benchmarking, integrated indicator, operational efficiency, economy, safety, method, risk of the erroneous decision

**For citation:** Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Farzaliyev Y. Z., Ashurova U. K. (2020) Internal Benchmarking of Thermal Power Plants of Electric Power Systems. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (6), 541–553. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-541-553> (in Russian)

### Введение

Расчет объективной оценки оперативной эффективности работы объектов электроэнергетических систем относится к числу наиболее актуальных и трудных задач [1]. Сложность решения вытекает из многомерности понятия «эффективность работы». В современном представлении эффективность – это интегральное свойство объектов, состоящее из трех комплекс-

ных свойств: экономичности, надежности и безопасности. Они, в свою очередь, состоят из множества единичных свойств, степень проявления каждого из которых определяется технико-экономическими показателями. Некоторые из них, прежде всего показатели безопасности работы, определяются лишь качественной оценкой [2].

Методология расчета интегрального показателя ОЭР объектов ЭЭС, в котором были бы учтены все единичные показатели, отсутствует. На практике оценка и сравнение ОЭР сводятся к использованию одного из среднемесячных значений показателя экономичности, выбранного по тем или иным соображениям (например, удельный расход условного топлива и потери электроэнергии), и интуитивного учета надежности и безопасности. Такая методология во многом себя оправдывает при условии, что срок службы основного оборудования не превышает нормативного значения, поскольку тогда она основывается на гарантиях завода-изготовителя о соответствии надежности и безопасности работы оборудования предъявляемым требованиям. Однако когда гарантии завода-изготовителя уже не действуют, значимость указанных свойств резко возрастает. Недостаточный учет надежности и безопасности работы приводит к недопустимым последствиям, которые проявляются в травмировании и гибели персонала, нарушении экологии, больших материальных затратах. А поскольку доля основного оборудования объектов ЭЭС, срок службы которого превышает нормативное значение, составляет часто не менее 60 %, актуальность объективной оценки интегрального показателя, отражающего экономичность, надежность и безопасность ОЭР, очевидна.

Говоря о значимости интегрального показателя, стоит подчеркнуть, что он необходим для перехода от интуитивного (качественного) сравнения ОЭР к количественному (объективному) сравнению. Этот подход именуется бенчмаркингом и позволяет существенно снизить риск ошибочного решения при распределении нагрузки, организации технического обслуживания и ремонта. Заметим, что отсутствие методологии оценки ОЭР объектов, срок службы которых превышает нормативное значение, еще не означает отсутствие методов расчета. В частности, методы расчета интегральных показателей экономической эффективности рассмотрены во многих научных статьях [3].

Суть рекомендуемых методов оценки интегрального показателя  $I_p$  эффективности работы при этом сводится к двум подходам:

- к формированию линейного уравнения регрессии, т. е.  $I_p = \sum_{i=1}^m a_i \Pi_i$ ,

где  $a_i$  – постоянный коэффициент при ТЭП  $\Pi_i$ ;  $i = 1, m$ ;  $m$  – число показателей;

- к суммированию произведений относительных значений реализаций технико-экономических показателей  $\varepsilon \Pi_i = |\Pi_i - M^*(\Pi_i)| / M^*(\Pi_i)$  на

коэффициенты значимости  $b_i$ , т. е.  $I_p = \sum_{i=1}^m b_i \varepsilon \Pi_i$ , где  $M^*(\Pi_i)$  – среднее арифметическое возможных реализаций  $\Pi_i$ .

Коэффициенты  $b_i$  с  $i = 1, m$  определяются экспертно и поэтому во многом субъективны. Кроме того, эти интегральные показатели не имеют фи-

зического смысла, что обуславливает трудность их понимания при сравнении и практическом использовании. Для предотвращения возникновения недопустимых последствий рекомендуется [4] усилиями отраслевых научно-исследовательских и проектно-изыскательных институтов разработать:

- проекты модернизации производственных предприятий ЭЭС. Масштабная концентрация финансовых и иных ресурсов для замены объектов, срок службы которых превышает нормативное значение, далеко не всегда доступна даже экономически развитым странам, тем более что использование этих объектов при определенных условиях не только возможно, но и целесообразно;

- методы и интеллектуальные алгоритмы оперативного анализа и контроля технического состояния объектов ЭЭС с целью совершенствования их эксплуатации, технического обслуживания и ремонта.

В основе интеллектуального управления должны находиться:

- недопустимость превышения предельных значений ТЭП эффективности работы;
- непосредственная взаимосвязь технического состояния узлов основного оборудования с периодичностью их диагностики;
- формирование стратегии восстановления износа, обеспечивающей максимальное увеличение ОЭР предприятий ЭЭС [5];
- система дистанционной переподготовки персонала для оперативного управления объектами, срок службы которых превышает нормативное значение.

### Совершенствование метода расчета интегральных показателей ОЭР

В [6] был предложен новый метод расчета интегрального показателя. Его принципиальное отличие от существующих методов состоит в переходе к сложению относительных отклонений ТЭП  $\{\Pi_i\}_m$  от нормативных значений  $\{\delta\Pi_i\}_m$ , где  $\Pi_i$  – условное обозначение  $i$ -го ТЭП;  $i = 1, m$ ;  $m$  – число ТЭП. Расчеты  $\delta\Pi_i$  в зависимости от направленности изменения  $\Pi_i$  проводятся по формуле  $\delta\Pi_i = [\Pi_i - \underline{\Pi}_i^{\Phi}] / \Delta\Pi_i^{\Phi}$  или  $\delta\Pi_i = [\overline{\Pi}_i^{\Phi} - \Pi_i] / \Delta\Pi_i^{\Phi}$ , где  $\underline{\Pi}_i^{\Phi}$  и  $\overline{\Pi}_i^{\Phi}$  – соответственно нижние и верхние граничные значения фидуциального интервала;  $\Delta\Pi_i^{\Phi} = (\overline{\Pi}_i^{\Phi} - \underline{\Pi}_i^{\Phi})$  – ширина фидуциального интервала.

Относительное отклонение от номинального (заводского) значения (т. е. от  $\underline{\Pi}_i^{\Phi}$  или  $\overline{\Pi}_i^{\Phi}$ ) аналогично модели износа [7], а среднее значение реализаций  $\{\delta\Pi_i\}_m$  характеризует среднюю величину износа. Таким образом, ОЭР определяется средней величиной износа объекта: чем он меньше, тем выше эффективность работы.

Опыт сравнения эффективности работы основного оборудования тепловых электростанций (ТЭС) свидетельствует о том, что риск ошибочного решения существенно зависит от степени разброса реализаций ТЭП. В частности, установлено, что риск ошибочного решения при сравнении средних арифметических значений относительных отклонений ТЭП неприемлем при существенном расхождении реализаций ТЭП.

В качестве иллюстрации рассмотрим пример, упрощение которого преследовало лишь цель снижения громоздкости. Предположим, что необхо-

димо сопоставить эффективность работы двух объектов, относительные значения комплексных показателей экономичности ( $\delta W$ ) и надежности ( $\delta R$ ) которых составляют: для первого объекта  $\delta W_1 = 0,16$  и  $\delta R_1 = 0,81$ , для второго объекта  $\delta W_2 = 0,48$  и  $\delta R_2 = 0,49$ . Интегральный показатель ОЭР определяем как среднее арифметическое комплексных показателей  $\delta W$  и  $\delta R$ . Для первого объекта  $I_{p1} = 0,485$ , для второго объекта  $I_{p2} = 0,485$ , т. е.  $I_{p1} = I_{p2}$ . Следовательно:

- если сопоставить объекты по экономичности (например, по удельному расходу условного топлива) и пренебречь надежностью, то, поскольку  $\delta W_1 < \delta W_2$ , предпочтение отдается первому объекту;
- если сопоставить лишь надежность объектов (например, вероятность отказа), то у первого она существенно выше, чем у второго, и предпочтение по ОЭР отдается второму объекту;
- если сопоставить интегральные показатели, то, поскольку  $I_{p1} = I_{p2}$ , получается, что ОЭР у объектов одна и та же.

Подобная неоднозначность объясняется тем, что среднее арифметическое значение не учитывает, что разброс реализаций ТЭП у первого объекта существенно больше, чем у второго. Таким образом, чтобы устранить разрегулировку ТЭП, на ремонт нужно вывести первый объект.

Определим теперь интегральный показатель как среднее геометрическое  $\delta W$  и  $\delta R$ . В частности, математика при расчете среднего значения многомерных величин рекомендует использовать не среднее арифметическое, а среднее геометрическое значение. Имеем:  $I_{p1} = \sqrt{\delta W_1 \delta R_1} = \sqrt{0,16 \cdot 0,81} = 0,36$ ;  $I_{p2} = \sqrt{\delta W_2 \delta R_2} \cong 0,494$ . Поскольку величина износа первого объекта значительно меньше аналогичной величины второго объекта, ОЭР первого объекта оказывается больше, чем второго. Таким образом, мы получили результат, обратный ожидаемому. Причиной такого казуса является механическое использование формул среднего геометрического. Дело в том, что среднее геометрическое значение, в соответствии с теоремой Коши [8], не больше среднего арифметического. Иначе говоря, необходимо выбирать объекты не с минимальным износом, а с минимальным остаточным ресурсом. А интегральные показатели вычислять по формулам:  $I_{p1} = \sqrt{(1 - \delta W_1)(1 - \delta R_1)}$ ;  $I_{p2} = \sqrt{(1 - \delta W_2)(1 - \delta R_2)}$ . Расчеты показывают:  $I_{p1} = 0,40$ ;  $I_{p2} = 0,51$ , т. е.  $I_{p1} < I_{p2}$  и первый объект имеет меньшую ОЭР, что полностью соответствует интуитивному анализу реализаций комплексных показателей. К недостаткам оценки интегральных показателей, вычисляемых как среднее геометрическое случайных величин, следует отнести усложнение алгоритма, громоздкость и трудоемкость ручного счета.

Известно [9], что сравнения двух выборок случайных величин по среднему арифметическому значению реализаций выборок далеко недостаточно для заключения о случайном характере их расхождения. Значительное влияние оказывает и величина их фидуциального интервала. Если согласиться с тем, что нормированные значения реализаций ТЭП относятся к выборке случайных величин, то их сопоставление с аналогичными выборками по величине среднего арифметического значения  $M^*(\delta\Pi)$  будет недостаточным для обеспечения достоверности решения. Необходимо при-

нять во внимание как минимум характер их разброса от среднего значения, т. е. величину среднего квадратического отклонения  $\sigma^*(\delta\Pi)$ . А учитывая вероятные различия средних значений, следует привлечь величину коэффициента вариации: чем он больше, тем больше и разрегулировка ТЭП.

### Пример оценки и ранжирования интегральных показателей ОЭР

Для снижения громоздкости вычислений сопоставляемых интегральных показателей ОЭР проведем оценку на примере котельных установок энергоблоков 300 МВт на газомазутном топливе. В табл. 1 указаны данные относительных отклонений ряда ТЭП, последовательность расчета которых приведена в [10].

Таблица 1

Реализации относительных отклонений среднемесячных значений ТЭП котельной установки энергоблока 300 МВт на газомазутном топливе

Implementation of relative deviations of the average monthly values of the TEI of the boiler plant of the 300 MW power unit that runs on gas-and-oil fuel

| $i$ | Условное обозначение ТЭП | Диспетчерский номер энергоблока |       |                       |       |       |       |       |       |
|-----|--------------------------|---------------------------------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     |                          | 1                               | 2     | 3                     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
| 1   | $\delta T_{\text{п}}$    | 0,145                           | 0,09  | Блок № 3<br>в ремонте | 0,087 | 0,128 | 0,099 | 0,109 | 0,041 |
| 2   | $\delta T_{\text{в}}$    | 0,327                           | 0,134 |                       | 0,302 | 0,141 | 0,230 | 0,233 | 0,245 |
| 3   | $\delta T_{\text{уг}}$   | 0,304                           | 0,686 |                       | 0,390 | 0,782 | 0,207 | 0,150 | 0,232 |
| 4   | $\delta K_{\text{в}}$    | 0,372                           | 0,142 |                       | 0,252 | 0,329 | 0,372 | 0,367 | 0,252 |
| 5   | $\delta \Delta S$        | 0,603                           | 0,500 |                       | 0,532 | 0,385 | 0,532 | 0,449 | 0,500 |
| 6   | $\delta \eta_{\text{б}}$ | 0,632                           | 0,645 |                       | 0,649 | 0,653 | 0,686 | 0,214 | 0,612 |
| 7   | $\delta \Xi_{\text{э}}$  | 0,105                           | 0,098 |                       | 0,16  | 0,089 | 0,188 | 0,050 | 0,098 |
| 8   | $\delta \Xi_{\text{т}}$  | 0,071                           | 0,092 |                       | 0,094 | 0,099 | 0,129 | 0,079 | 0,076 |
| 9   | $\delta \eta_{\text{н}}$ | 0,232                           | 0,235 |                       | 0,280 | 0,235 | 0,322 | 0,192 | 0,221 |
| 10  | $\delta b_{\text{т}}$    | 0,034                           | 0,125 |                       | 0,118 | 0,089 | 0,135 | 0,039 | 0,016 |

**Примечания:**  $T_{\text{п}}$  – температура питательной воды;  $T_{\text{в}}$  – температура воздуха после РВП;  $T_{\text{уг}}$  – температура уходящих газов;  $K_{\text{в}}$  – коэффициент избытка воздуха;  $\Delta S$  – присосы воздуха на тракте;  $\eta_{\text{б}}$  – КПД брутто;  $\Xi_{\text{э}}$  – расход электроэнергии в системе собственных нужд КУ;  $\Xi_{\text{т}}$  – расход тепловой энергии в системе собственных нужд КУ;  $\eta_{\text{н}}$  – КПД нетто;  $b_{\text{т}}$  – удельный расход условного топлива.

По данным табл. 1 проведены расчеты оценок:

- средних арифметических значений ТЭП, характеризующих степень отклонения от нормативного (заводского) значения, т. е. величину износа  $M_{\text{н}}^*(t_j)$  и величину остаточного ресурса  $M_{\text{р}}^*(t_j)$ ;
- средних геометрических значений ТЭП  $G_{\text{н}}^*(t_j)$  и  $G_{\text{р}}^*(t_j)$  соответственно;
- коэффициентов вариаций значений ТЭП  $K_{\text{н}}^*(t_j)$  и  $K_{\text{р}}^*(t_j)$  соответственно.

Интегральные показатели ОЭР классифицированы по котельным установкам энергоблоков ТЭС и по ТЭП всех энергоблоков ТЭС. Интегральные показатели по ТЭП котельных установок, по сути, характеризуют зна-

чимось ТЭП. Результаты расчетов интегральных показателей ОЭР и их ранжирование представлены следующим образом:

- $M_n^*(t_j)$ ,  $G_n^*(t_j)$ ,  $K_{r_n}^*(t_j)$  для котельных установок энергоблоков приведены в табл. 2, а для характеристики значимости ТЭП – в табл. 3;

- $M_p^*(t_j)$ ,  $G_p^*(t_j)$ ,  $K_{r_p}^*(t_j)$  для котельных установок энергоблоков приведены в табл. 4, а для характеристики значимости – в табл. 5.

Следует отметить, что выборки данных для расчета интегральных показателей ОЭР котельных установок и для характеристики значимости ТЭП принципиально отличаются. Например, интегральный показатель ОЭР

$r$ -й котельной установки вычисляется по формуле  $M_r^*(t_j) = 0,1 \sum_{i=1}^{10} \delta \Pi_{i,r}$ ,

а для характеристики значимости конкретного ТЭП – по формуле  $M_r^*(t_j) = 7^{-1} \sum_{r=1}^7 \delta \Pi_{i,r}$ .

Таким образом, первая выборка – это реализация десяти ТЭП конкретного  $i$ -го энергоблока, а вторая – реализация одного ТЭП, но для всех энергоблоков.

Таблица 2

**Результаты расчетов и ранжирования среднемесячных значений интегральных показателей ОЭР энергоблоков 300 МВт по величине износа**  
**Results of calculations and ranking of average monthly values of integrated indicators of the OE of 300 MW power units by wear value**

| Тип интегрального показателя ТЭП | Характеристика             | Диспетчерский номер энергоблока |       |   |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|----------------------------|---------------------------------|-------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                  |                            | 1                               | 2     | 3 | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
| Среднее арифметическое           | Оценка                     | 0,283                           | 0,250 | Р | 0,275 | 0,293 | 0,321 | 0,188 | 0,199 |
|                                  | Номер в ранжированном ряду | 5                               | 3     | Е | 4     | 6     | 7     | 1     | 2     |
| Среднее геометрическое           | Оценка                     | 0,203                           | 0,180 | М | 0,219 | 0,215 | 0,272 | 0,145 | 0,128 |
|                                  | Номер в ранжированном ряду | 4                               | 3     | О | 6     | 5     | 7     | 2     | 1     |
| Коэффициент вариации             | Оценка                     | 0,741                           | 0,962 | Н | 0,720 | 0,846 | 0,625 | 0,717 | 0,907 |
|                                  | Номер в ранжированном ряду | 4                               | 7     | Т | 3     | 5     | 1     | 2     | 6     |

Таблица 3

**Результаты расчетов и ранжирования среднемесячных значений интегральных показателей ОЭР ТЭП энергоблоков 300 МВт по степени отклонения**  
**Results of calculations and ranking of the average monthly values of integrated indicators of the OE of the TEI of 300 MW power units by the degree of deviation**

| Тип $I_p$        | Характеристика             | Порядковый номер ТЭП |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------|----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  |                            | 1                    | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| $M_n^*(t_j)$     | Оценка                     | 0,100                | 0,231 | 0,394 | 0,298 | 0,500 | 0,584 | 0,113 | 0,091 | 0,245 | 0,079 |
|                  | Номер в ранжированном ряду | 3                    | 5     | 8     | 7     | 9     | 10    | 4     | 2     | 6     | 1     |
| $G_n^*(t_j)$     | Оценка                     | 0,093                | 0,218 | 0,325 | 0,285 | 0,494 | 0,552 | 0,104 | 0,090 | 0,242 | 0,063 |
|                  | Номер в ранжированном ряду | 3                    | 5     | 8     | 7     | 9     | 10    | 4     | 2     | 6     | 1     |
| $K_{r_n}^*(t_j)$ | Оценка                     | 0,364                | 0,348 | 0,686 | 0,291 | 0,169 | 0,282 | 0,412 | 0,214 | 0,174 | 0,618 |
|                  | Номер в ранжированном ряду | 7                    | 6     | 10    | 5     | 1     | 4     | 8     | 3     | 2     | 9     |

Таблица 4

**Результаты расчетов и ранжирования среднемесячных значений  
интегральных показателей ОЭР энергоблоков 300 МВт  
по величине остаточного ресурса**

**Results of calculations and ranking of monthly average values  
of integrated indicators of 300 MW power units by the value  
of the residual resource**

| Тип<br>$I_p$    | Характеристика             | Диспетчерский номер энергоблока |       |   |       |       |       |       |       |
|-----------------|----------------------------|---------------------------------|-------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 |                            | 1                               | 2     | 3 | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
| $M_p^*(t_j)$    | Оценка                     | 0,717                           | 0,750 | P | 0,725 | 0,707 | 0,679 | 0,812 | 0,801 |
|                 | Номер в ранжированном ряду | 5                               | 3     | E | 4     | 6     | 7     | 1     | 2     |
| $G_p^*(t_j)$    | Оценка                     | 0,685                           | 0,702 | M | 0,695 | 0,649 | 0,646 | 0,801 | 0,777 |
|                 | Номер в ранжированном ряду | 4                               | 3     | O | 6     | 5     | 7     | 1     | 2     |
| $K_{vp}^*(t_j)$ | Оценка                     | 4,292                           | 0,320 | H | 0,273 | 0,350 | 0,296 | 0,166 | 0,225 |
|                 | Номер в ранжированном ряду | 4                               | 6     | T | 3     | 7     | 5     | 1     | 2     |

Таблица 5

**Результаты расчетов и ранжирования среднемесячных значений  
интегральных показателей ОЭР ТЭП энергоблоков 300 МВт по остаточному ресурсу**

**Results of calculations and ranking of the average monthly values  
of integrated indicators of the OI of the TEI of 300 MW power units by residual resource**

| Тип $I_p$       | Характеристика             | Порядковый номер ТЭП |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 |                            | 1                    | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| $M_p^*(t_j)$    | Оценка                     | 0,900                | 0,769 | 0,606 | 0,694 | 0,541 | 0,415 | 0,887 | 0,908 | 0,755 | 0,920 |
|                 | Номер в ранжированном ряду | 3                    | 5     | 8     | 7     | 9     | 10    | 4     | 2     | 6     | 1     |
| $G_p^*(t_j)$    | Оценка                     | 0,899                | 0,766 | 0,539 | 0,689 | 0,529 | 0,396 | 0,886 | 0,908 | 0,754 | 0,919 |
|                 | Номер в ранжированном ряду | 3                    | 5     | 8     | 7     | 9     | 10    | 4     | 2     | 6     | 1     |
| $K_{vp}^*(t_j)$ | Оценка                     | 0,040                | 0,104 | 0,445 | 0,133 | 0,233 | 0,397 | 0,052 | 0,021 | 0,056 | 0,053 |
|                 | Номер в ранжированном ряду | 2                    | 6     | 10    | 7     | 8     | 9     | 3     | 1     | 5     | 4     |

Анализ таблиц позволяет сделать следующие заключения.

1. Результаты ранжирования интегральных показателей  $M_n^*(t_j)$ ,  $G_n^*(t_j)$ ,  $K_{vn}^*(t_j)$  можно считать различными. Например, ОЭР котельной установки наилучшая по данным  $M_n^*(t_j)$  у седьмого энергоблока, по данным  $G_n^*(t_j)$  – у восьмого энергоблока, а по данным  $K_{vn}^*(t_j)$  – у шестого энергоблока (табл. 2).

2. Результаты ранжирования интегральных показателей  $M_p^*(t_j)$ ,  $G_p^*(t_j)$ ,  $K_{vp}^*(t_j)$  свидетельствуют о неизменности результата для  $M_p^*(t_j)$  по сравнению с  $M_n^*(t_j)$ . Ранжировка  $G_p^*(t_j)$  изменилась по сравнению с  $G_n^*(t_j)$  и стала более походить на ранжировку  $M_p^*(t_j)$ . Ранжировка  $K_{vp}^*(t_j)$  существенно изменилась по сравнению с  $K_{vn}^*(t_j)$ .

3. Если исходить из положения, что показатель  $M_p^*(t_j)$  характеризует общее техническое состояние котельной установки энергоблока, а показатель  $K_{vp}^*(t_j)$  – наличие одного или двух ТЭП с резко возросшим в интервале  $t_j$  относительным отклонением, то можно предположить, что показатель  $M_p^*(t_j)$  выявляет котельные установки энергоблоков, где требуется существенное восстановление износа большей части узлов, т. е. энергоблоки, подлежащие капитальному ремонту. По данным табл. 4, это котельная установка шестого энергоблока. Показатель  $K_{vp}^*(t_j)$  определяет котельные установки энергоблоков, подлежащие текущему ремонту, в течение которого должны быть восстановлены износ одного или двух узлов. По данным табл. 4, это котельная установка пятого энергоблока.

4. Данные табл. 3 и 5 позволяют заключить, что ранжирование интегральных показателей  $M_n^*(t_j)$ ,  $M_p^*(t_j)$ ,  $G_n^*(t_j)$ ,  $G_p^*(t_j)$  идентично и достаточно вычислить лишь показатель  $M_p^*(t_j)$ . Как следует из этих таблиц, наименьшее относительное отклонение от предельно допустимого значения наблюдается для КПД (брутто) и присосов воздуха в котельной установке, на что необходимо обратить внимание при капитальном ремонте шестого энергоблока. При текущем ремонте котельной установки пятого энергоблока основное внимание следует уделить снижению разброса такого ТЭП, как температура уходящих газов.

#### **Анализ взаимосвязи интегральных показателей эффективности работы объектов ЭЭС**

Несмотря на отмеченные преимущества коэффициента вариации  $K_v^*(t_j)$  по сравнению со средним геометрическим значением  $G^*(t_j)$  в части контрастности отображения разброса нормированных значений ТЭП, простоты вычисления и ясного физического смысла, вопрос об использовании при сопоставлении всех трех интегральных показателей объективно не решен. В [11] при анализе ряда показателей разброса в качестве критерия принятия решения было выбрано условие минимума коэффициента корреляции взаимосвязи реализаций показателей разброса. И это естественно, так как взаимосвязь интегральных показателей приводит к большому риску ошибочного решения. Для оценки взаимосвязи показателей  $M^*(t_j)$ ,  $G^*(t_j)$ ,  $K_v^*(t_j)$  был выполнен следующий эксперимент [12].

1. Стандартной программой RANDU моделировалось случайное число  $\xi$  с равномерным распределением в интервале  $[0, 1]$ .

2. Для случайного числа  $\xi$  по фидуциальному распределению (по статистической функции распределения) фактических реализаций нормированных значений ТЭП вычислялась соответствующая величина нормированной реализации.

3. Пункты 1 и 2 повторялись  $n$  раз, где  $n$  – число реализаций ТЭП, по которым вычисляется интегральный показатель.

4. Для выборки из  $n$  нормированных реализаций по известным формулам вычислялись три интегральных показателя  $M^*(t_j)$ ,  $G^*(t_j)$ ,  $K_V^*(t_j)$ .

5. Пункты 1–3 повторялись  $N$  раз, где  $N$  – число моделируемых реализаций выборок. Результаты расчета выборок интегральных показателей  $M^*(t_j)$ ,  $G^*(t_j)$ ,  $K_V^*(t_j)$  приведены в табл. 6.

6. Симметричный характер распределения  $F^*[M^*(t_j)]$ ,  $F^*[G^*(t_j)]$ ,  $F^*[K_V^*(t_j)]$  и достаточно большое число реализаций  $N$  позволяли применить методологию расчета коэффициента корреляции Пирсона [13]. Результаты расчетов приведены в табл. 7.

Как следует из табл. 7, наименьшая и практически незначимая взаимосвязь наблюдается для интегральных показателей  $M^*(\xi)$  и  $K_V^*(\xi)$ , что подтверждает целесообразность определения эффективности работы объектов ЭЭС путем сопоставления  $M^*(t_j)$  и  $K_V^*(t_j)$ . В иллюстративных целях на рис. 1–3 приведены корреляционные поля, характеризующие взаимосвязь интегральных показателей.

Таблица 6

Реализации интегральных показателей для выборок с  $n = 5$

Implementations of integral indicators for samples with  $n = 5$

| №<br>пп | $M^*(t_j)$ | $G^*(t_j)$ | $K_V^*(t_j)$ |
|---------|------------|------------|--------------|
| 1       | 0,176      | 0,088      | 1,224        |
| 2       | 0,210      | 0,175      | 0,637        |
| 3       | 0,233      | 0,108      | 1,173        |
| 4       | 0,252      | 0,109      | 1,529        |
| 5       | 0,269      | 0,213      | 0,783        |
| 6       | 0,284      | 0,206      | 0,913        |
| 7       | 0,299      | 0,265      | 0,454        |
| 8       | 0,312      | 0,224      | 0,851        |
| 9       | 0,325      | 0,292      | 0,538        |
| 10      | 0,337      | 0,132      | 0,919        |
| 11      | 0,351      | 0,315      | 0,400        |
| 12      | 0,354      | 0,357      | 0,223        |
| 13      | 0,379      | 0,297      | 0,702        |
| 14      | 0,393      | 0,318      | 0,738        |
| 15      | 0,409      | 0,357      | 0,655        |
| 16      | 0,426      | 0,394      | 0,458        |
| 17      | 0,446      | 0,293      | 0,622        |
| 18      | 0,471      | 0,404      | 0,515        |
| 19      | 0,507      | 0,372      | 0,706        |
| 20      | 0,691      | 0,674      | 0,258        |

Таблица 7

Коэффициенты корреляции Пирсона между интегральными показателями табл. 6

Pearson correlation coefficients between integral indicators of Tab. 6

| № пп | Интегральный показатель |              | Коэффициент корреляции |
|------|-------------------------|--------------|------------------------|
| 1    | $M^*(t_j)$              | $G^*(t_j)$   | 0,925                  |
| 2    | $M^*(t_j)$              | $K_V^*(t_j)$ | –0,603                 |
| 3    | $G^*(t_j)$              | $K_V^*(t_j)$ | –0,778                 |

При сопоставлении рисунков нетрудно заметить, что наибольший разброс взаимосвязи наблюдается между интегральными показателями  $M^*(\xi)$  и  $K_V^*(\xi)$ . Следовательно, именно эти два показателя целесообразно использовать для снижения риска ошибочного решения при сравнении эффективности работы объектов ЭЭС.

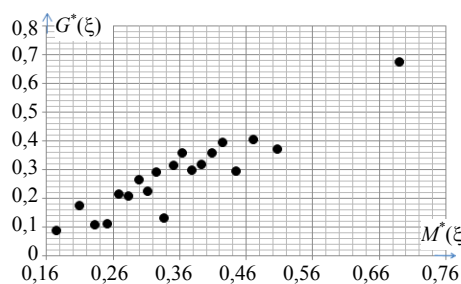


Рис. 1. Взаимосвязь интегральных показателей  $M^*(\xi)$  и  $G^*(\xi)$   
Fig. 1. Relationship of integral indicators  $M^*(\xi)$  and  $G^*(\xi)$

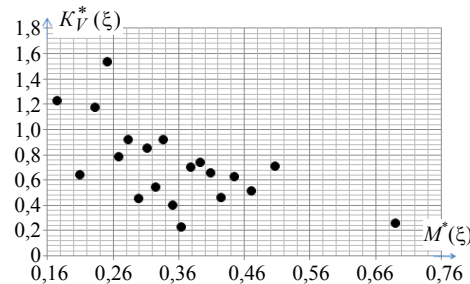


Рис. 2. Взаимосвязь интегральных показателей  $M^*(\xi)$  и  $K_v^*(\xi)$   
Fig. 2. Relationship of integral indicators  $M^*(\xi)$  and  $K_v^*(\xi)$

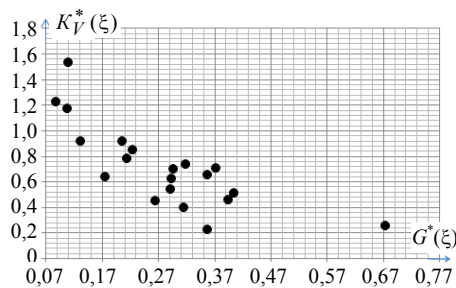


Рис. 3. Взаимосвязь интегральных показателей  $G^*(\xi)$  и  $K_v^*(\xi)$   
Fig. 3. Relationship of integral indicators  $G^*(\xi)$  and  $K_v^*(\xi)$

## ВЫВОДЫ

1. Чтобы восстановить, сохранить или даже повысить эффективность работы объектов электроэнергетических систем, необходимо при организации их эксплуатации, диагностике технического состояния, планировании проведения текущего и капитального ремонта принимать решения на основе не интуитивного подхода, а сопоставления интегральных показателей оперативной эффективности работы.

2. Громоздкость расчетов, наукоемкость современных методов количественной оценки интегральных показателей, риск грубых ошибок, нарушение условия оперативности в процессе подготовки рекомендаций при ручном счете требуют выполнения бенчмаркинга на основе компьютерных технологий.

3. Отсутствие физического смысла у интегрального показателя эффективности работы в существующих методах его расчета, субъективный характер коэффициентов значимости в уравнении взаимосвязи интегрального показателя и технико-экономических показателей объекта, недостаточный учет разброса нормированных значений реализаций технико-экономических показателей являются основными факторами риска ошибочного решения, а следовательно, и ошибочных рекомендаций по повышению эффективности работы.

4. В основе расчета интегральных показателей оперативной эффективности работы рекомендуемым методом находится средняя величина оста-

точного ресурса свойств объекта, характеризующих технико-экономическими показателями. Сведения об остаточном ресурсе необходимы, прежде всего, для прогнозирования времени проведения капитального ремонта. Коэффициент вариации нормированных значений остаточного ресурса определяет степень разрегулирования объекта и позволяет выявить узлы, требующие непрерывной диагностики технического состояния, планировать время проведения текущего ремонта.

5. Следует рассматривать автоматизированные рекомендации по повышению эффективности работы объектов электроэнергетических систем лишь как обоснованную методическую поддержку для лиц, принимающих решения. Со временем перечень технико-экономических показателей, необходимых для принятия решения, может существенно корректироваться, охватывая все новые факторы, определяющие эффективность работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Концепция обеспечения надежности в электроэнергетике / Н. И. Воропай [и др.]. М.: Энергия, 2013. 304 с.
2. Количественная оценка пожарной опасности объектов электроэнергетических систем / Э. М. Фархадзаде [и др.] // Энергетик. 2019. № 8. С. 10–15.
3. Васильева, Л. В. Анализ методических подходов к построению интегральных экономических показателей [Электронный ресурс] / Л. В. Васильева // Экономические исследования и разработки. 2017. № 12. Режим доступа: <http://edrj.ru/article/18-12-17>.
4. Дьяков, А. Ф. Проблемы и пути повышения надежности ЕЭС России / А. Ф. Дьяков, Я. Ш. Исамухаммедов, В. В. Молодюк // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики / отв. ред. Н. И. Воропай. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2014. Вып. 64. Надежность систем энергетики: достижения, проблемы, перспективы. С. 8–16.
5. Фархадзаде, Э. М. Оценка качества восстановления износа энергоблоков ТЭС / Э. М. Фархадзаде, А. З. Мурадалиев, Ю. З. Фарзалиев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 1. С. 14–24. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-1-14-24>.
6. Метод и алгоритм сравнения эффективности работы газопоршневых электростанций электроэнергетических систем / Э. М. Фархадзаде [и др.] // Известия РАН. Энергетика. 2019. № 2. С. 106–117.
7. Методы и алгоритмы сравнения и ранжирования надежности и экономичности работы объектов ЭЭС по разнотипным данным / Э. М. Фархадзаде [и др.] // Электричество. 2017. № 8. С. 4–13. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2017-8-4-13>.
8. Фалин, Г. Н. Неравенство для средних / Г. Н. Фалин, А. Л. Фалин // Математика. 2006. № 10. С. 25–36.
9. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности: основные характеристики надежности и их статистический анализ / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. Изд. 3, стереотип. М.: URSS, 2019. 584 с.
10. Повышение эффективности работы энергоблоков тепловых электростанций / Э. М. Фархадзаде [и др.] // Электрические станции. 2019. № 8. С. 14–17.
11. Фархадзаде, Э. М. Распределение выборки непрерывной случайной величины / Э. М. Фархадзаде, А. З. Мурадалиев, Ю. З. Фарзалиев // Электронное моделирование. 2015. № 6. С. 69–82.
12. Минимизация риска ошибочного решения при оценке значимости статистических связей технико-экономических показателей объектов электроэнергетических систем / Э. М. Фархадзаде [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 3. С. 193–206. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-61-3-193-206>.

13. Кендалл, М. Г. Статистические выводы и связи / М. Г. Кендалл, А. Стьюарт. Пер. с англ. М.: Наука, 1973. 900 с.

Поступила 18.03.2020 Подписана в печать 26.05.2020 Опубликовано онлайн 30.11.2020

#### REFERENCES

1. Voropai N. I. et al. (2013) *The Concept of Ensuring Reliability in the Electric Power Engineering*. Moscow, Energiya Publ., 2013. 304 (in Russian).
2. Farhadzade E. M., Muradaliyev A. Z., Ismailova S. M., Yusifli R. F. (2019) Quantitative Assessment of Fire Hazard of Electric Power System Objects. *Energetik*, (8), 10–15 (in Russian).
3. Vasilieva L. (2017) Analysis of Methodical Approaches to the Development of Integral Economic Indicators. *Ekonomicheskie Issledovaniya i Razrabotki = Economic Development Research Journal*, (12). Available at: <http://edri.ru/article/18-12-17> (in Russian).
4. D'yakov A. F., Isamukhammedov Ya. Sh., Molodyuk V. V. (2014) Problems and Ways to Improve the Reliability of the UES of Russia. *Metodicheskie Voprosy Issledovaniya Nadezhnosti Bol'shikh Sistem Energetiki. Vyp. 64. Nadezhnost' Sistem Energetiki: Dostizheniya, Problemy, Perspektivy* [Methodological Problems in Reliability of Large Energy System. Is. 64. Reliability of Energy Systems: Achievements, Problems, Prospects]. Irkutsk: ISEM SB RAS, 8–16 (in Russian).
5. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Farzaliyev Yu. Z. (2016) Quality Evaluation of the TPP Power Generating Units Wear Reconditioning. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (1), 14–24. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-1-14-24> (in Russian).
6. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Calaqova E. I., Abdullayeva S. A. (2019) Method and Algorithm of Comparison Efficiency of Gas and Piston Power Stations of the Electro Power Systems. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], (2), 106–117 (in Russian).
7. Farhadzadeh E. M., Farzaliyev Yu. Z., Muradaliyev A. Z., Ismailova S. M. (2017) Methods and Algorithms for Comparing and Ranking the Reliability and Efficiency of EPS Facilities Based on Different Types of Data. *Elektrichestvo*, (8), 4–13. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2017-8-4-13> (in Russian).
8. Falin G. N., Falin A. L. (2006) Inequality for Averages. *Matematika* [Mathematics], (10), 25–36 (in Russian).
9. Gnedenko B. V., Belyaev Yu. K., Solov'ev A. D. (2019) *Mathematical Methods in Reliability Theory: Basic Characteristics of Reliability and their Statistical Analysis*. 3<sup>rd</sup> ed. Moscow, URSS Publ. 584 (in Russian).
10. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Rafieva T. K., Rustamova A. A. (2019) Improving the Operational Efficiency of Thermal Power Plant Units. *Elektricheskie Stantsii = Electrical Stations*, (8), 14–17 (in Russian).
11. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Farzaliyev Yu. Z. (2015) Distribution of a Continuous Random Variable Sample. *Elektronnoe Modelirovanie = Electronic Modeling*, (6), 69–82 (in Russian).
12. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Farzaliyev Yu. Z., Rafiyeva T. K., Abdullayeva S. A. (2018) Minimization of Risk of the Erroneous Decision in the Assessment of the Importance of Statistical Relations of Technical and Economic Indicators of the Objects of Electric Power Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 193–206. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-61-3-193-206> (in Russian).
13. Kendall M. G., Stuart A. (1968) *The Advanced Theory of Statistics*. In 3 volumes. 2<sup>nd</sup> ed. New York, Hafner Publ. Co. 557.

Received: 18 March 2020 Accepted: 26 May 2020 Published online: 30 November 2020

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-554-562>

УДК 658.261:621.56

## Термодинамический анализ озонобезопасных низкокипящих рабочих тел для турбодетандерных установок

А. В. Овсянник<sup>1)</sup>, В. П. Ключинский<sup>1)</sup>

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020  
Belarusian National Technical University, 2020

**Реферат.** В статье рассмотрены 46 низкокипящих рабочих тел (НКРТ), имеющих нулевой потенциал разрушения озонового слоя: 14 однокомпонентных гидрофторуглеродных хладагентов, 28 многокомпонентных смесей гидрофторуглеродных хладагентов и четыре природных хладагента. Произведен термодинамический анализ рабочих тел на базе классической турбодетандерной схемы с теплообменным аппаратом, предназначенным для охлаждения перегретого НКРТ, покинувшего турбодетандер. Для данной схемы построен цикл в  $T$ - $s$ -координатах. Сравнение НКРТ производилось по эксергетическому коэффициенту полезного действия (КПД). В ходе исследования выявлено, что для некоторых НКРТ последовательность расположения зависимостей эксергетического КПД от температуры при оптимальных с термодинамической точки зрения давлениях рабочих тел сохраняется на всем изучаемом интервале температур (от 100 до 300 °С). Иными словами, если рабочее тело имеет наибольший эксергетический КПД, то это свойство присуще ему при любой температуре в заданном интервале. Анализ НКРТ по эксергетическому КПД предложено проводить по произвольно выбранной температуре (250 °С). Исследование показало, что наибольшим эксергетическим КПД из природных хладагентов обладает R600A (50,25 %), среди однокомпонентных гидрофторуглеродных хладагентов – R245FA (50,00 %), R1233ZD(E) (49,91 %), R236EA (49,59 %), среди многокомпонентных смесей гидрофторуглеродных хладагентов – R429A (47,92 %), R430A (47,49 %) и R423A (47,47 %). Из всех рассмотренных НКРТ наибольший эксергетический КПД имеют: R600A, R245FA, R1233ZD(E), R236EA, R1234ZE(Z), R236FA. Они принадлежат как к природным хладагентам (углеводороды), так и к однокомпонентным гидрофторуглеродным. Следует отметить, что у каждого из этих рабочих тел есть свои недостатки: одни обладают высоким потенциалом глобального потепления, другие взрывоопасны, третьи имеют высокую стоимость.

**Ключевые слова:** турбодетандер, фреон, хладагент, вторичные энергетические ресурсы, тепловые отходы, термодинамическая эффективность, эксергетический анализ, потенциал разрушения озонового слоя, потенциал глобального потепления, гидрофторуглероды, природные хладагенты, смесевые хладагенты, однокомпонентные хладагенты, температура кипения, низкопотенциальная энергия, эмиссия парниковых газов, изменение климата

**Для цитирования:** Овсянник, А. В. Термодинамический анализ озонобезопасных низкокипящих рабочих тел для турбодетандерных установок / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 6. С. 554–562. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-554-562>

---

### 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, Octiabria Ave.,  
246746, Gomel, Republic of Belarus  
Tel.: +375 232 40-20-36  
ovsyannik@tut.by

---

## Thermodynamic Analysis of Ozone-Safe Low Boiling Working Media for Turbo-Expander Plants

A. V. Ovsyannik<sup>1)</sup>, V. P. Kliuchinski<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Sukhoi State Technical University of Gomel (Gomel, Republic of Belarus)

**Abstract.** The article considers 46 low-boiling working media (LBWM) with zero potential for ozone layer destruction. Out of them, 14 ones are single-component hydrofluorocarbon refrigerants, 28 ones are multi-component mixtures of hydrofluorocarbon refrigerants, and the four ones are native refrigerants. Thermodynamic analysis of working media based on the classical turbo-expander scheme with a heat exchanger designed to cool the superheated LBWM that has left the turbo-expander has been performed. For this scheme, a cycle is constructed in  $T$ - $s$ -coordinates. The LBWM was compared using the exergetic coefficient of efficiency (KE). In the course of the study, it was found that for some LBWM, the sequence of location of the exergetic efficiency dependences on temperature at thermodynamically optimal working medium pressures is preserved over the entire temperature range under study (from 100 to 300 °C). In other words, if the working medium has the highest exergetic efficiency coefficient, then this property is inherent in it at any temperature in a given interval. It is proposed to perform the analysis of the LBWM for exergetic efficiency at an arbitrarily selected temperature (250 °C). The study demonstrated that the highest exergetic efficiency of natural refrigerants is R600A (50.25 %), among single-component hydrofluorocarbon refrigerants – R245FA (50.00 %), R1233ZD(E) (49.91 %), R236EA (49.59 %), among multi-component mixtures of hydrofluorocarbon refrigerants – R429A (47.92 %), R430A (47.49 %) and R423A (47.47 %). Out of the all examined refrigerants, the following ones have the highest exergetic efficiency of all the considered LBWM: R600A, R245FA, R1233ZD(E), R236EA, R1234ZE(Z), R236FA. They belong to both natural refrigerants (hydrocarbons) and single-component hydrofluorocarbons. It should be noted that each of these working media has its drawbacks: some have a high potential for global warming, others are explosive, and others have a high cost.

**Keywords:** turbodetander, freon, refrigerant, secondary energy resources, thermal waste, thermodynamic efficiency, exergetic analysis, ozone layer destruction potential, global warming potential, hydrofluorocarbons, natural refrigerants, mixed refrigerants, single-component refrigerants, boiling point, low-potential energy, greenhouse gas emissions, climate change

**For citation:** Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. (2020) Thermodynamic Analysis of Ozone-Safe Low Boiling Working Media for Turbo-Expander Plants. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (6), 554–562. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-554-562> (in Russian)

### Введение

Все более широкое применение в современной энергетике приобретают турбодетандерные установки с рабочим телом, имеющим более низкую, чем у воды, температуру кипения. Благодаря этому испарение низкокипящего рабочего тела происходит при относительно низкой температуре, что и позволяет утилизировать низкопотенциальную энергию.

Однако выбор рабочего тела является сложной и многокритериальной задачей [1–4]. Решения Монреальского протокола коренным образом изменили подход к традиционным озоноразрушающим хладагентам, и начиная с 1990-х гг. на одно из первых мест вышел вопрос об опасности изменения климата и сохранения эмиссии парниковых газов, вызванной такими хладагентами. Для анализа экологической целесообразности применения хладагентов используют следующие параметры: озоноразрушающий потенциал (ОРП) и потенциал глобального потепления (ПГП) (парникового эффекта). Для хладагентов группы хлорфторуглероды  $\text{ОРП} \geq 1$ , для гидрохлорфторуглеродов  $\text{ОРП} < 0,1$ , а для гидрофторуглеродов  $\text{ОРП} = 0$  [5].

Таким образом, основные требования к НКРТ можно разделить на следующие группы: экологические, термодинамические, эксплуатационные, экономические. Хладагенты, отвечающие всем перечисленным требованиям, найти практически невозможно [6]. С термодинамической точки зрения одним из основных критериев выбора рабочего тела является максимальная удельная работа цикла или максимальный коэффициент полезного действия.

Эксергия – предельное значение энергии, которое может быть полезным образом использовано (получено или затрачено) в термодинамическом процессе с учетом ограничений, накладываемых законами термодинамики. Эксергетический анализ, учитывающий потери от неравновесности процессов в системе, позволяет выполнить как относительную, так и абсолютную оценку степени термодинамического совершенства применяемых технологий по сравнению с анализом, основанным на энергетическом КПД [7–9].

Предлагается оценить эффективность НКРТ, обладающих нулевым потенциалом разрушения озонового слоя, при помощи эксергетического КПД. Методика термодинамического анализа турбодетандерных циклов на НКРТ представлена в [10].

### Турбодетандерная схема и принцип ее работы

Исследования проводились на примере классической турбодетандерной схемы с теплообменным аппаратом на выходе из турбодетандера, предназначенным для охлаждения перегретого НКРТ, покинувшего турбодетандер (рис. 1).

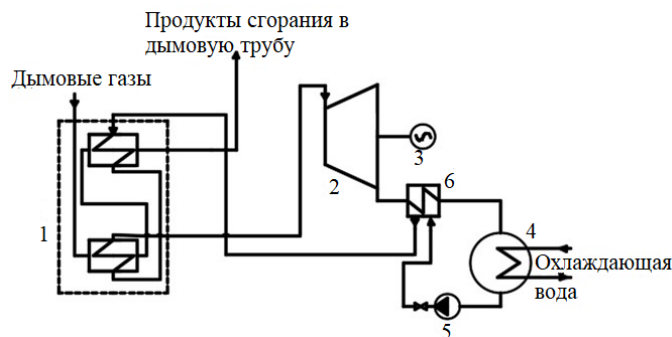


Рис. 1. Схема турбодетандерного цикла: 1 – котел-утилизатор; 2 – турбодетандер; 3 – генератор; 4 – конденсатор; 5 – насос; 6 – теплообменник

Fig. 1. The scheme of the turbo-expander cycle: 1 – heat recovery boiler; 2 – turbo expander; 3 – generator; 4 – condenser; 5 – pump; 6 – heat exchanger

Принцип работы представленной схемы следующий: из конденсатора 4 жидкое НКРТ насосом 5 подается в теплообменный аппарат 6, где нагревается парами НКРТ, поступающими в теплообменный аппарат из турбодетандера 2. После нагрева в теплообменнике 6 рабочее тело направляется в котел-утилизатор 1, где нагревается, испаряется и перегревается. Далее оно поступает в турбодетандер, где совершает механическую работу вращения вала турбодетандера 2, связанного муфтой с генератором электрического тока 3. Затем НКРТ, будучи еще в перегретом состоянии, охлаждается до температуры, близкой к температуре насыщения при данном

давлении, в теплообменнике 6 и поступает в конденсатор 4, где и конденсируется.

Для термодинамического анализа приняты следующие условия и исходные данные: объем, состав и температура продуктов сгорания неизменны во всех исследуемых случаях; температура на выходе из конденсатора (температура конденсации) равна 25 °С для всех рабочих тел; коэффициент полезного действия элементов установки для всех исследуемых случаев одинаковы. При этом расход рабочего тела выбирается таким образом, чтобы обеспечивалась его необходимая температура на выходе из котла-утилизатора при неизменном объеме, составе и температуре продуктов сгорания. Выбор давления рабочего тела перед турбодетандером производится так, чтобы получить максимальный эксергетический КПД при данной температуре.

Цикл исследуемой схемы представлен на  $T$ - $s$ -диаграмме (рис. 2) на примере хладагента R245FA при температуре рабочего тела перед турбодетандером 250 °С и оптимальном давлении.

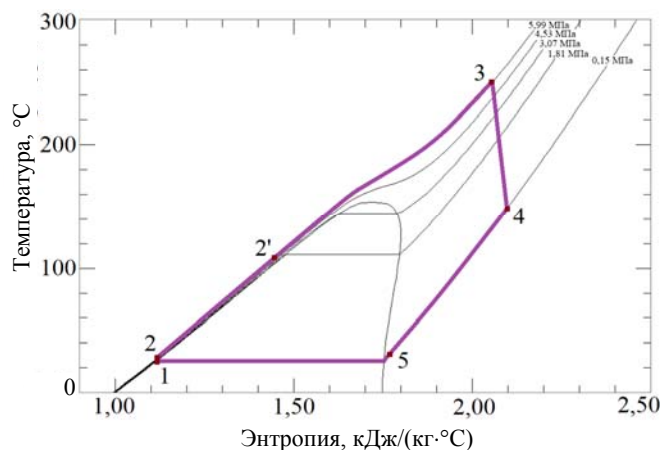


Рис. 2. Цикл турбодетандерной установки в  $T$ - $s$ -координатах

Fig. 2. The cycle of a turbo-expander unit presented in  $T$ - $s$ -coordinates

Цикл состоит из следующих процессов: 1–2 – повышение давления НКРТ в насосе 5; 2–2' – изобарный процесс нагрева рабочего тела в теплообменнике 6; 2'–3 – изобарный процесс нагрева, парообразования и перегрева в котле-утилизаторе 1; 3–4 – процесс расширения НКРТ в турбодетандере 2; 4–5 – изобарный процесс охлаждения паров хладагента в теплообменнике 6; 5–1 – изобарный процесс охлаждения и конденсации паров хладагента в конденсаторе 4.

### Термодинамический анализ и результаты исследований

В ходе исследования выявлено, что для некоторых НКРТ (рис. 3) последовательность расположения зависимостей эксергетического КПД от температуры при оптимальных с термодинамической точки зрения давлениях рабочих тел сохраняется на всем изучаемом интервале температур (от 100 до 300 °С). Иными словами, рабочее тело, доминирующее по

эксергетическому КПД, является таковым при любой температуре в заданном интервале. Предложено анализ рабочих тел по эксергетическому КПД осуществлять по произвольно выбранной температуре (250 °С).

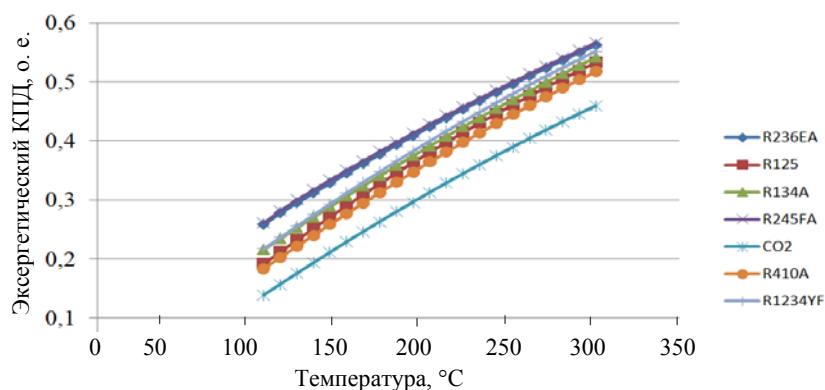


Рис. 3. Зависимость эксергетического коэффициента полезного действия от температуры для различных низкокипящих рабочих тел

Fig. 3. Dependence of exergetic efficiency on temperature for various low-boiling working fluids

На основе вышесказанного произведен расчет цикла для различных рабочих тел при температуре 250 °С. Рабочие тела, исследуемые в данной статье, некоторые их показатели, а также результаты расчетов представлены в табл. 1–3. Для удобства анализа полученные результаты приведены в виде диаграммы (рис. 4).

Таблица 1

Исследуемые однокомпонентные хладагенты [11, 12]

Single-component refrigerants under study [11, 12]

| №<br>пп | Рабочее тело | ОРИ | ППП<br>(100 лет) | Давление НКРТ перед<br>турбодетандером, МПа | Эксергетический<br>КПД, % |
|---------|--------------|-----|------------------|---------------------------------------------|---------------------------|
| 1       | R125         | 0   | 3450             | 13,32                                       | 46,15                     |
| 2       | R134A        | 0   | 1360             | 10,38                                       | 46,97                     |
| 3       | R143A        | 0   | 5080             | 11,94                                       | 46,50                     |
| 4       | R152A        | 0   | 124              | 9,02                                        | 46,56                     |
| 5       | R227EA       | 0   | 3220             | 9,16                                        | 48,34                     |
| 6       | R23          | 0   | 14760            | 16,65                                       | 40,58                     |
| 7       | R236EA       | 0   | 1370             | 6,78                                        | 49,59                     |
| 8       | R236FA       | 0   | 9810             | 7,43                                        | 48,72                     |
| 9       | R245FA       | 0   | 1030             | 5,98                                        | 50,00                     |
| 10      | R32          | 0   | 674              | 13,51                                       | 42,59                     |
| 11      | R1234YF      | 0   | 4                | 9,80                                        | 47,95                     |
| 12      | R1234ZE(E)   | 0   | 6                | 8,95                                        | 47,62                     |
| 13      | R1234ZE(Z)   | 0   | 1,4              | 5,51                                        | 49,42                     |
| 14      | R1233ZD(E)   | 0   | 1                | 4,91                                        | 49,91                     |

Таблица 2

**Исследуемые смесевые хладагенты [11, 12]**

**The mixed refrigerants under study [11, 12]**

| №<br>пп                                                                                                                                                            | Рабочее тело | ОРП | ПГП<br>(100 лет) | Давление НКРТ перед<br>турбодетандером, МПа | Эксергетический<br>КПД, % |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----|------------------|---------------------------------------------|---------------------------|
| 1                                                                                                                                                                  | R404A        |     | 4200             | 12,38                                       | 46,38                     |
| 2                                                                                                                                                                  | R407A        | 0   | 2100             | 12,91                                       | 45,07                     |
| 3                                                                                                                                                                  | R407B        | 0   | 2800             | 13,28                                       | 45,58                     |
| 4                                                                                                                                                                  | R407C        | 0   | 1700             | 12,58                                       | 44,89                     |
| 5                                                                                                                                                                  | R407D        | 0   | 1600             | 11,88                                       | 45,27                     |
| 6                                                                                                                                                                  | R407E        | 0   | 1500             | 12,36                                       | 44,82                     |
| 7                                                                                                                                                                  | R410A        | 0   | 2100             | 14,14                                       | 44,47                     |
| 8                                                                                                                                                                  | R413A        | 0   | 2000             | 10,85                                       | 46,54                     |
| 9                                                                                                                                                                  | R417A        | 0   | 2300             | 11,86                                       | 46,20                     |
| 10                                                                                                                                                                 | R419A        | 0   | 2900             | 12,34                                       | 45,81                     |
| 11                                                                                                                                                                 | R421A        | 0   | 2600             | 12,24                                       | 45,98                     |
| 12                                                                                                                                                                 | R421B        | 0   | 3100             | 12,98                                       | 46,06                     |
| 13                                                                                                                                                                 | R422A        | 0   | 3100             | 12,90                                       | 46,23                     |
| 14                                                                                                                                                                 | R422B        | 0   | 2500             | 12,16                                       | 46,12                     |
| 15                                                                                                                                                                 | R422C        | 0   | 3000             | 12,84                                       | 46,19                     |
| 16                                                                                                                                                                 | R422D        | 0   | 2700             | 12,43                                       | 46,14                     |
| 17                                                                                                                                                                 | R423A        | 0   | 2200             | 10,10                                       | 47,47                     |
| 18                                                                                                                                                                 | R424A        | 0   | 2400             | 11,97                                       | 46,13                     |
| 19                                                                                                                                                                 | R425A        | 0   | 1500             | 11,60                                       | 45,28                     |
| 20                                                                                                                                                                 | R426A        | 0   | 1400             | 10,55                                       | 46,81                     |
| 21                                                                                                                                                                 | R427A        | 0   | 2200             | 12,34                                       | 45,26                     |
| 22                                                                                                                                                                 | R429A        | 0   | 21               | 8,88                                        | 47,92                     |
| 23                                                                                                                                                                 | R430A        | 0   | 120              | 9,25                                        | 47,49                     |
| 24                                                                                                                                                                 | R431A        | 0   | 46               | 10,84                                       | 47,26                     |
| 25                                                                                                                                                                 | R434A        | 0   | 3300             | 12,51                                       | 46,23                     |
| 26                                                                                                                                                                 | R435A        | 0   | 30               | 9,11                                        | 47,07                     |
| 27                                                                                                                                                                 | R437A        | 0   | 1700             | 11,01                                       | 46,46                     |
| 28                                                                                                                                                                 | R507A        | 0   | 4300             | 12,49                                       | 46,38                     |
| <b>Примечание.</b> Хладагенты R508A и R508B не рассматривались, так как их критическая температура ниже температуры конденсации НКРТ в конденсаторе (менее 25 °C). |              |     |                  |                                             |                           |

Таблица 3

**Исследуемые природные хладагенты [11, 12]**

**The natural refrigerants under study [11, 12]**

| №<br>пп | Рабочее тело     | ОРП | ПГП<br>(100 лет) | Давление НКРТ перед<br>турбодетандером, МПа | Эксергетический<br>КПД, % |
|---------|------------------|-----|------------------|---------------------------------------------|---------------------------|
| 1       | Диоксид углерода | 0   | 1                | 21,92                                       | 38,92                     |
| 2       | Аммиак           | 0   | 0                | 12,98                                       | 39,88                     |
| 3       | R290             | 0   | 3                | 10,50                                       | 47,53                     |
| 4       | R600A            | 0   | 3                | 6,99                                        | 50,25                     |

Как видно из рис. 4, наибольшим эксергетическим КПД обладает природный хладагент R600A (50,25 %). Среди однокомпонентных гидро-

фторуглеродных хладагентов наибольший эксергетический КПД имеют R245FA (50,00 %), R1233ZD(E) (49,91 %), R236EA (49,59 %), среди многокомпонентных смесей гидрофторуглеродных хладагентов – R429A (47,92 %), R430A (47,49 %) и R423A (47,47 %).

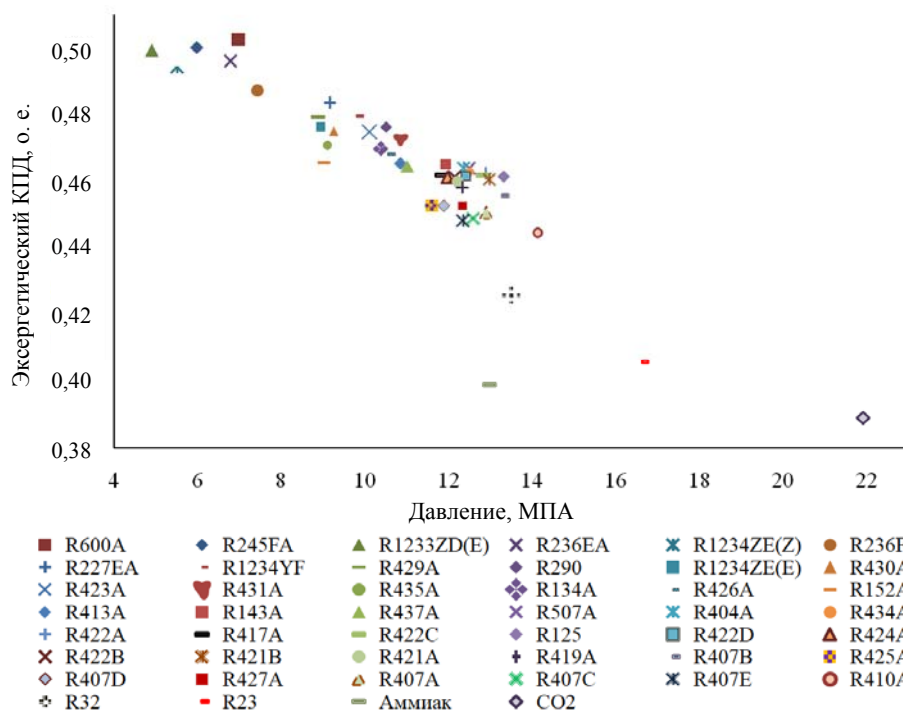


Рис. 4. Результаты исследований низкокипящих рабочих тел (указаны в порядке уменьшения их эксергетического КПД)

Fig. 4. The results of the study of the low-boiling working media (indicated in order of decreasing their exergetic efficiency)

Из всех рассмотренных НКРТ наибольшим эксергетическим КПД обладают следующие хладагенты: R600A, R245FA, R1233ZD(E), R236EA, R1234ZE(Z), R236FA. Они принадлежат как к природным хладагентам (углеводороды), так и к однокомпонентным гидрофторуглеродным. R600A (изобутан) имеет низкий потенциал глобального потепления (ПГП = 3), но при этом пожаровзрывоопасен; R245FA, R236EA и R236FA являются однокомпонентными гидрофторуглеродными хладагентами, но обладают довольно высоким потенциалом глобального потепления (ПГП R245FA = 1030, ПГП R236EA = 1370, ПГП R236FA = 9810); у R1233ZD(E), R1234ZE(Z) низкий потенциал глобального потепления (ПГП R1233ZD(E) = 4,91; ПГП R1234ZE(Z) = 5,51), они не взрывоопасны, но имеют довольно высокую стоимость.

Обратим внимание на следующую тенденцию: большим эксергетическим КПД обладают рабочие тела с меньшим оптимальным (с термодинамической точки зрения) давлением при данной исследуемой температуре. Изучив потери эксергии по элементам турбодетандерной установки выборочно для некоторых рабочих тел с различными эксергетическими КПД (рис. 5), не удалось выявить, какие из потерь эксергии оказывают решающее влияние

на выбор рабочего тела. Так, например, сравнив рабочие тела R1233ZD(E) и R236EA, можно заметить, что R1233ZD(E) имеет большие потери эксергии в котле-утилизаторе, однако меньшие потери эксергии в насосе и теплообменном аппарате делают его более эффективным по сравнению с R236EA. Сопоставление R236EA и R430A выявляет обратную тенденцию: R236EA, обладающий большим эксергетическим КПД, имеет меньшие потери эксергии в котле-утилизаторе, но большие потери в теплообменнике.

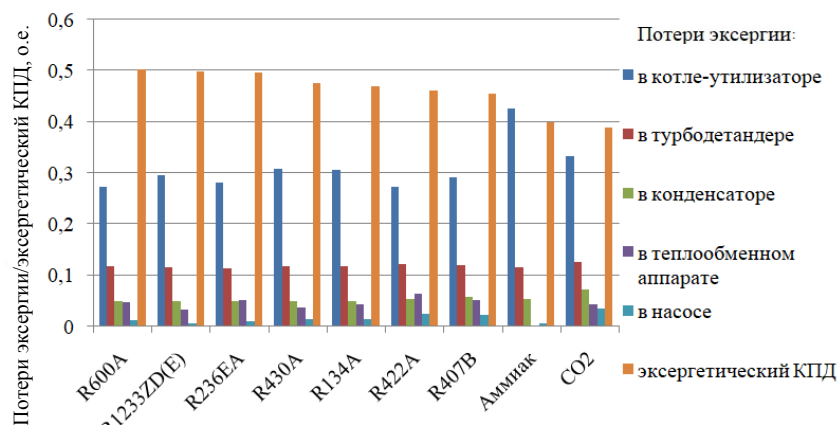


Рис. 5. Потери эксергии по элементам турбодетандерной установки

Fig. 5. Exergy losses according to the elements of a turbo-expander unit

## ВЫВОДЫ

1. Последовательность расположения зависимостей эксергетического КПД от температуры при оптимальных с термодинамической точки зрения давлениях рабочих тел сохраняется на всем исследуемом интервале температур (от 100 до 300 °C), т. е. рабочее тело, обладающее наибольшим эксергетическим КПД при заданной температуре, имеет наибольший эксергетический КПД на всем исследуемом интервале температур.

2. Наибольшим эксергетическим КПД обладают следующие рабочие тела: R600A, R245FA, R1233ZD(E), R236EA, R1234ZE(Z), R236FA. Дальнейший анализ этих рабочих тел показал, что каждому из них присущи свои недостатки: у одних высокий потенциал глобального потепления, другие взрывоопасны, третьи имеют высокую стоимость. В ходе исследований выявлено, что большим эксергетическим КПД обладают рабочие тела с меньшим оптимальным (с термодинамической точки зрения) давлением при данной исследуемой температуре.

## ЛИТЕРАТУРА

1. On the Role of Working Fluid Properties in Organic Rankine Cycle Performance / M. Z. Stijepovic [et al.] // Applied Thermal Engineering. 2012. Vol. 36. P. 406–413. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.10.057>.
2. Fluid Selection and Parametric Optimization of Organic Rankine Cycle Using Low Temperature Waste Heat / Z. Q. Wang [et al.] // Energy. 2012. Vol. 40, Is. 1. P. 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.022>.
3. 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>.

4. Овсянник, А. В. Определение параметров теплообмена при парообразовании смесевых хладагентов на высокотеплопроводных порошковых спеченных капиллярно-пористых покрытиях / А. В. Овсянник, Е. Н. Макеева // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 1. С. 70–79. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-70-79>.
  5. Бабакин, Б. С. Альтернативные хладагенты и сервис холодильных систем на их основе / Б. С. Бабакин, В. И. Стефанчук, Е. Е. Ковтунов. М.: Колос, 2000. 160 с.
  6. Белов, Г. В. Органический цикл Ренкина и его применение в альтернативной энергетике / Г. В. Белов, М. А. Дорохова // *Наука и образование: науч. изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана*. 2014. № 2. С. 99–124.
  7. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. М.: Энергия, 1973. 295 с.
  8. Бродянский, В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек; под ред. В. М. Бродянского. М.: Энергоатомиздат, 1988. 288 с.
  9. Шаргут, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. М.: Энергия, 1968. 280 с.
  10. Тригенерация энергии в турбодетандерных установках на диоксиде углерода / А. В. Овсянник [и др.] // *Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого*. 2019. № 2. С. 41–51.
  11. Синтетические холодильные агенты, регулируемые Киотским протоколом / О. Б. Цветков [и др.] // *Научный журнал НИУ ИТМО. Сер. Холодильная техника и кондиционирование*. 2015. № 4. С. 1–8.
  12. Озонобезопасные хладагенты / О. Б. Цветков [и др.] // *Научный журнал НИУ ИТМО. Сер. Холодильная техника и кондиционирование*. 2014. № 3. С. 98–111.
- Поступила 20.02.2020    Подписана в печать 28.04.2020    Опубликована онлайн 30.11.2020

## REFERENCES

1. Stijepovic M. Z., Linke P., Papadopoulos A. I., Grujic A. S. (2012) On the Role of Working Fluid Properties in Organic Rankine Cycle Performance. *Applied Thermal Engineering*, 36, 406–413. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.10.057>.
2. Wang Z., Zhou Q. N. J., Guo J., Wang X. Y. (2012) Fluid Selection and Parametric Optimization of Organic Rankine Cycle Using Low Temperature Waste Heat. *Energy*, 40 (1), 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.022>.
3. Ovsyannik A. V. (2019) Carbon Dioxide Turbine Expander Plant Producing Liquid and Gaseous Carbon Dioxide. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 77–87. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87> (in Russian).
4. Ovsyannik A. V., Makeeva E. N. (2018) Determining of Parameters of Heat Exchange for Vaporization of the Mixed Refrigerant on the High Thermal Conductivity Sintered Powder Capillary-Porous Coatings. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (1), 70–79. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-70-79> (in Russian).
5. Babakin B. S., Stefanchuk V. I., Kovtunov E. E. (2000) *Alternative Refrigerants and Service of Refrigeration Systems Based on them*. Moscow, Kolos Publ. 160 (in Russian).
6. Belov G. V., Dorokhova M. A. (2014) Organic Rankine Cycle and its Application in Renewable Power Engineering. *Nauka i Obrazovanie = Science & Education*, (2), 99–124 (in Russian).
7. Brodyanskii V. M. (1973) *Exergetic Method of Thermodynamic Analysis*. Moscow, Energia Publ. 295 (in Russian).
8. Brodyanskii V. M., Fratsher V., Mikhalek K. (1988) *Exergetic Method and its Applications*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 288 (in Russian).
9. Shargut Y., Petela R. (1968) *Exergy*. Moscow, Energia Publ. 280 (in Russian).
10. Ovsyannik A. V., Valchenko N. A., Kovalchuk P. A., Arshukov A. I. (2019) Trigeneration of Energy in Carbon Dioxide Turbo-Expander Plants. *Vestnik GGTU imeni P. O. Sukhogo [Bulletin of the Sukhoi State Technical University of Gomel]*, (2), 41–51 (in Russian).
11. Tsvetkov O. B., Baranenko A. V., Laptev Yu. A., Sapozhnikov S. Z., Fedorov A. V., Kushnerov A. B. (2015) Kyoto Protocol and Environmentally Acceptable Synthetic Halocarbon Refrigerants. *Nauchnyi Zhurnal NIU ITMO. Ser. Kholodil'naya Tekhnika i Konditsionirovanie = Scientific Journal NRU ITMO. Series Refrigeration and Air Conditioning*, (4), 1–8 (in Russian).
12. Tsvetkov O. B., Baranenko A. V., Sapozhnikov S. Z., Laptev Yu. A., Pyatakov G. L., Khovalyg D. M. (2014) Ozone Layer-Safe Refrigerants. *Nauchnyi Zhurnal NIU ITMO. Ser. Kholodil'naya Tekhnika i Konditsionirovanie = Scientific Journal NRU ITMO. Series Refrigeration and Air Conditioning*, (3), 98–111 (in Russian).

Received: 20 February 2020    Accepted: 28 April 2020    Published online: 30 November 2020

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-563-580>

УДК 628.112

## Математические модели скважинных водозаборов с разветвленной и кольцевой схемами соединения сборных водоводов

В. В. Верemenюк<sup>1)</sup>, В. В. Ивашечкин<sup>1)</sup>, В. И. Крицкая<sup>1)</sup>

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020  
Belarusian National Technical University, 2020

**Аннотация.** Скважинные водозаборы подземных вод широко используются для водоснабжения агрогородков, городских поселков, малых и крупных городов, мегаполисов. Численность потребителей в указанных населенных пунктах определяет количество водозаборов, число скважин водозабора, их производительность, схемы расположения и подключения к сборным водоводам. В связи с увеличением масштабов использования подземных вод производятся реконструкция и расширение действующих водозаборов. Эти работы сопровождаются тампонажем вышедших из строя скважин, их перебуриванием, бурением дополнительных скважин, перекладкой старых и прокладкой новых сборных водоводов. Все это приводит к усложнению конфигурации сборных водоводов из-за строительства переемычек и колец, появлению новых скважин с линиями подключения. В новых условиях, чтобы правильно установить режимы работы водозабора с минимальными затратами энергии на подъем и подачу заданного объема воды в сборно-регулирующие резервуары, верно выбрать соответствующее водоподъемное оборудование в скважинах, разработать мероприятия по интенсификации водозабора с прогнозом их эффективности и оптимизировать работу водозабора, необходимо построить его математическую модель, позволяющую выполнять комплексные расчеты. Самыми сложными для создания математической модели являются водозаборы с разветвленными сборными водоводами, а также с площадной схемой расположения скважин и кольцевой схемой соединения сборных водоводов. Методика расчета подобных водозаборов недостаточно освещена в литературе, отсутствуют конкретные примеры расчета. Целью настоящей статьи является уточнение методики расчета скважинных водозаборов с разветвленными сборными водоводами и с кольцевой схемой их соединения.

**Ключевые слова:** водозабор подземных вод, водоснабжение, разветвленные сборные водоводы, математическая модель водозабора, удельный дебит скважин

**Для цитирования:** Верemenюк, В. В. Математические модели скважинных водозаборов с разветвленной и кольцевой схемами соединения сборных водоводов / В. В. Верemenюк, В. В. Ивашечкин, В. И. Крицкая // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 6. С. 563–580. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-563-580>

---

### Адрес для переписки

Ивашечкин Владимир Васильевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 67/2,  
220065, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-30-13  
fes@bntu.by

### Address for correspondence

Ivashechkin Vladimir V.  
Belarusian National Technical University  
67/2, Nezavisimosty Ave.,  
220065, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-30-13  
fes@bntu.by

---

## The Borehole Water Intakes Mathematical Models with a Branched and Circular Connection Schemes for Prefabricated Water Conduits

V. V. Veremenyuk<sup>1)</sup>, V. V. Ivashechkin<sup>1)</sup>, V. I. Krytskaya<sup>1)</sup>

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

**Abstract.** Borehole water intakes of underground water are widely used for water supply of agricultural towns, urban settlements, small and large cities and megacities. The number of consumers in these localities determines the number of water intakes, the number of wells, their productivity, location and connection to the prefabricated water conduits. Due to the increase in the use of underground water, the existing water intakes are being reconstructed and expanded. These works are accompanied by grouting of failed wells, their re-drilling, drilling of additional wells, re-laying of old and laying of new prefabricated water conduits. All this causes the complexity of the configuration of prefabricated water conduits due to the construction of jumpers and rings, the emergence of new wells with connection lines. Under the new conditions, in order to properly develop water intake operating modes which meet the minimum energy consumption for lifting and delivering a required volume of water to the collection-and-control tanks, to accurately choose the appropriate water lifting equipment in wells, to develop measures for intensifying water intake alongside with a forecast of their efficiency and to optimize the operation of the water intake, it is necessary to create its mathematical model that allows performing complex calculations. Water intakes with ramified prefabricated water conduits, as well as with an area scheme of the location of wells and a ring scheme of the connection of prefabricated water conduits are the most difficult object for mathematical modeling. The methods of calculating such water intakes are not sufficiently reflected in the literature, and there are no specific examples of calculation. The present article aims to clarify the methodology for calculating borehole water intakes with ramified prefabricated water conduits and with a ring scheme of their connection.

**Keywords:** borehole groundwater intake, water supply, ramified prefabricated water conduits, mathematical model of water intake, specific flow rate of wells

**For citation:** Veremenyuk V. V., Ivashechkin V. V., Krytskaya V. I. (2020) The Borehole Water Intakes Mathematical Models with a Branched and Circular Connection Schemes for Prefabricated Water Conduits. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (6), 563–580. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-563-580> (in Russian)

### Введение

Скважинные водозаборы подземных вод при наличии хорошей защиты от загрязнения широко используются для водоснабжения агрогородков, городских поселков, малых и крупных городов, мегаполисов. Численность потребителей в указанных населенных пунктах определяет количество водозаборов, число скважин водозабора, их производительность, схемы расположения и подключения к сборным водоводам. В связи с увеличением масштабов использования подземных вод как более качественных по сравнению с поверхностными водами производятся реконструкция и расширение действующих водозаборов подземных вод. Эти работы сопровождаются тампонажем вышедших из строя скважин, их переобустройством, бурением дополнительных скважин, перекладкой старых и прокладкой новых сборных водоводов. Все это приводит к усложнению конфигурации сбор-

ных водоводов из-за строительства перемычек и колец, появления новых скважин с линиями подключения. В новых условиях, чтобы правильно установить режимы работы водозабора с минимальными затратами энергии на подъем и подачу заданного объема воды в сборно-регулирующие резервуары, верно выбрать соответствующее водоподъемное оборудование в скважинах, разработать мероприятия по интенсификации водозабора с прогнозом их эффективности и оптимизировать работу водозабора, необходимо построить его математическую модель, позволяющую выполнять комплексные расчеты.

Расчетам притока воды к скважинам и комплексным расчетам водозаборов подземных вод посвящены работы Ф. М. Бочевера, А. И. Арцева, В. С. Алексеева, Н. А. Плотникова, В. П. Старинского, А. Д. Гуриновича и др. [1–6]. Согласно [7], скважинные водозаборы условно разделяют по сложности обвязки скважин водоводами на следующие типы: 1) линейный ряд скважин (одна ветвь скважин) и один сборный водовод; 2) два или более линейных ряда скважин и их сборные водоводы; 3) площадная схема расположения скважин и кольцевая схема соединения сборных водоводов. Говоря упрощенно, первый тип – это линейные водозаборы; второй – водозаборы с разветвленными сборными водоводами, а третий – водозаборы с кольцевой схемой соединения сборных водоводов. Таким образом, второй и третий типы можно условно отнести к нелинейным водозаборам.

Методика расчета линейного водозабора широко освещена в литературе.

Более сложным с точки зрения расчета является водозабор, имеющий несколько ветвей. Методика расчета должна учитывать взаимосвязь ветвей скважин в системе уравнений, описывающих водозабор.

Наконец самыми сложными для создания математической модели являются водозаборы с разветвленными сборными водоводами, а также с площадной схемой расположения скважин и кольцевой схемой соединения сборных водоводов. Методика расчета таких водозаборов недостаточно освещена в литературе, конкретные примеры расчета отсутствуют.

Большинство научных работ посвящено проектированию новых водозаборов подземных вод, когда на основе материалов технического задания и данных гидрогеологических изысканий проектируются водозаборные скважины на заданную производительность, разрабатывается расчетная схема расположения скважин и сбора воды. В частности, в [1–6] изложены с примерами комплексные расчеты в основном простейших линейных водозаборов, только теоретически рассмотрено влияние кольматажа фильтров скважин на изменение производительности проектируемого водозабора во времени с целью обоснования сроков проведения его ремонта. В этой связи приобретает актуальность задача создания математической модели действующего водозабора, а не проектируемого, исходными данными для которого являются материалы натурного обследования: расчетная схема расположения скважин и сбора воды, фактические параметры пластов, характеристики скважин, насосного оборудования, параметры

трубопроводов, фактическое взаимовлияние скважин. Чтобы адаптировать разработанную математическую модель к реальным условиям, необходимо корректировать, проверять ее адекватность с учетом фактических значений напоров в узлах сборных водоводов и дебитов скважин.

Целью настоящей статьи является уточнение методики расчета скважинных водозаборов с разветвленными сборными водоводами и с кольцевой схемой их соединения.

### Основная часть

Рассмотрим алгоритмы и примеры расчета указанных выше типов водозаборов.

**Алгоритм расчета скважинных водозаборов с разветвленными сборными водоводами.** Расходы скважин находят на основе решения системы уравнений динамического равновесия водозабора [5]. В состоянии динамического равновесия водозабор находится тогда, когда напор  $H_n^H$  каждого установленного в скважине насоса численно равен потребному напору  $H_{n\text{потр}}^c$  в трубопроводе, соединяющем скважинный насос с резервуарами чистой воды (РЧВ) или станцией обезжелезивания (СОЖ). Число уравнений системы равно количеству скважин  $N$  линейного водозабора.

$$\left\{ \begin{array}{l} H_1^H - H_{1\text{потр}}^c = 0; \\ \dots\dots\dots \\ H_n^H - H_{n\text{потр}}^c = 0; \\ \dots\dots\dots \\ H_N^H - H_{N\text{потр}}^c = 0. \end{array} \right\}. \quad (1)$$

В водозаборах с несколькими ветвями скважин эти равенства, входящие в систему уравнений, группируют по ветвям водозабора в зависимости от характера их взаимосвязи.

Уравнение для  $n$ -й скважины водозабора имеет вид

$$H_n^H = S_n + H_{\text{ст.}n} + Z_n + \Delta H_n, \quad (2)$$

где  $S_n$  – понижение в скважине;  $H_{\text{ст.}n}$  – расстояние от устья скважины до статического уровня;  $Z_n$  – геометрический напор;  $\Delta H_n$  – суммарные потери напора в колонне водоподъемных труб, линии подключения к сборному водоводу и на участке сборного водовода от точки подключения до РЧВ (СОЖ).

Насос скважины развивает напор в соответствии с рабочей характеристикой, которая может быть аппроксимирована квадратичной функцией:

$$H_n^H = -a_n Q^2 + b_n Q + c_n, \quad (3)$$

где  $c_n$  – некоторый фиктивный напор насоса;  $a_n > 0$  и  $b_n$  – коэффициенты кривой  $H_n^H(Q)$  насоса, характеризующие его фиктивное гидравлическое сопротивление.

В общем случае переменное в процессе эксплуатации понижение в  $n$ -й скважине  $S_n(t)$  может быть представлено в виде

$$S_n(t) = S_{0n} + \Delta S_{к.н}(t) + \Delta S_{вл.н} + \Delta S_{ср.н}(t), \quad (4)$$

где  $S_{0n}$  – понижение уровня в самой скважине в условиях ее одиночной работы без учета кольматационных процессов;  $\Delta S_{к.н}(t)$  – дополнительное понижение уровня в данной скважине, обусловленное химическим кольматацией фильтра и прифильтровой зоны, происходящим во времени;  $\Delta S_{вл.н}$  – понижение (срезка) уровня в данной скважине, обусловленное влиянием всех совместно работающих скважин;  $\Delta S_{ср.н}(t)$  – дополнительное понижение уровня в  $n$ -й скважине, происходящее с течением времени в результате общей работы запасов подземных вод в пласте.

Понижение уровня  $S_{0n}$  в самой скважине найдем через ее удельный дебит  $q_n$ , измеренный в момент обследования:

$$S_{0n} = \frac{Q_n}{q_n}, \quad (5)$$

где  $Q_n$  – дебит скважины.

Удельный дебит скважины  $q_n(t)$  снижается в процессе эксплуатации вследствие кольматации и может быть представлен эмпирической зависимостью, предложенной в [8]:

$$q_{к.н}(t) = q_n e^{-\beta t}, \quad (6)$$

где  $\beta$  – коэффициент старения скважины, учитывающий снижение ее удельной производительности вследствие химического кольматации фильтра и прифильтровой зоны;  $t$  – рассматриваемый промежуток времени от момента обследования скважины. Значение коэффициента  $\beta$  определяют по результатам замеров удельного дебита от момента сооружения скважины.

Дополнительное понижение уровня  $\Delta S_{к.н}$  в данной скважине, обусловленное химическим кольматацией фильтра и прифильтровой зоны, найдем как разность понижений в самой скважине в процессе работы в условиях кольматации через промежуток времени  $t$  и на момент обследования ( $t = 0$ ), т. е. с учетом (5) и (6)

$$\Delta S_{к.н} = \frac{Q_n}{q_{к.н}(t)} - \frac{Q_n}{q_n} = \frac{Q_n}{q_n} (e^{\beta t} - 1). \quad (7)$$

Экспериментальное значение сниженного удельного дебита скважины  $q_{вл.н}$  в результате влияния взаимодействующих с ней скважин может быть определено по методу М. Е. Альтовского [9]

$$q_{вл.н} = q_n (1 - \alpha_n), \quad (8)$$

где  $\alpha_n = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq n}}^N \alpha_{j,n}$  – суммарный коэффициент снижения дебита, равный сум-

ме коэффициентов снижения дебита  $\alpha_{j,n}$  влияния всех  $j$ -х скважин, взаимодействующих с  $n$ -й скважиной;  $q_n$  – удельный дебит скважины на момент обследования при ее одиночной работе.

Коэффициенты снижения дебита  $\alpha_n$  определяются по данным откачек во время обследования водозабора.

Срезку уровня  $\Delta S_{вл.н}$  в данной скважине, обусловленную влиянием всех совместно работающих с ней скважин, найдем как разность понижений в самой скважине при совместной работе со всеми взаимодействующими с ней скважинами и при ее одиночной работе, т. е. с учетом (5) и (8)

$$\Delta S_{вл.н} = \frac{Q_n}{q_{вл.н}} - \frac{Q_n}{q_n} = \frac{Q_n}{q_n} \left( \frac{1}{1 - \alpha_n} - 1 \right). \quad (9)$$

Теоретически срезка уровня  $\Delta S_{вл.н}$  при произвольном расположении скважин в неограниченном напорном пласте может быть определена по формуле Форхгеймера [1]

$$\Delta S_{вл.н} = \frac{\sum_{j=1}^p \nabla Q_j \ln \left( \frac{R_j}{r_{jn}} \right)}{2\pi km}, \quad (10)$$

где  $p$  – число воздействующих скважин;  $Q_j$  – производительность воздействующей скважины;  $R_j$  – радиус влияния воздействующей скважины;  $r_{jn}$  – расстояние между рассматриваемой и воздействующей скважинами;  $\nabla$  – индекс, указывающий на то, что из суммы исключен член  $j = n$ ;  $k$  – коэффициент фильтрации;  $m$  – мощность пласта.

Величиной  $\Delta S_{ср.н}(t)$  в пластах с постоянно действующими источниками восполнения запасов подземных вод (реками, водохранилищами) и при наличии гидравлической связи с другими водообильными горизонтами пренебрегают, поскольку фильтрация в этих случаях приобретает установившийся характер. В процессе длительной эксплуатации водозабора величина  $\Delta S_{ср.н}(t)$  уменьшается, и ее можно не учитывать, так как фильтрация воды к водозабору приобретает установившийся характер. Кроме того, измеряемое во время обследования водозабора значение понижения уровня  $S_{0n}$  в каждой скважине уже учитывает сработку запасов  $\Delta S_{ср.н}(T_э)$  под-

земных вод за период эксплуатации  $T_3$  (время от сооружения скважины до момента ее обследования) [1].

При обследовании водозабора, характеризующегося неустановившейся фильтрацией, для нахождения  $\Delta S_{\text{ср.}n}(t)$  можно использовать данные эксплуатационных журналов каждой скважины и построить графики  $\Delta S_{\text{ср.}n}(t) = f(Q_i, t)$ , где  $\Delta S_{\text{ср.}n}(t)$  – дополнительное понижение уровня при постоянном расходе  $Q_i$  [1]. Эти кривые затем можно аппроксимировать эмпирическими зависимостями и подставить в выражение (4).

Приближенно расчет дополнительного понижения уровня  $\Delta S_{\text{ср.}n}(t)$  в скважине в результате сработки запасов подземных вод за период времени  $t$  (сутки) от момента ввода в эксплуатацию (проведения обследования) можно рассчитать по формуле [1]:

$$\Delta S_{\text{ср.}n}(t) = -\frac{\sum_{n=1}^N Q_n}{4\pi km} E_n(-\lambda_n), \quad (11)$$

где  $\sum_{n=1}^N Q_n$  – производительность водозабора;  $E_n(-\lambda_n)$  – интегральная показательная функция;  $\lambda_n$  – параметр, зависящий от типа пласта, коэффициента пьезопроводности  $a$  водовмещающих пород, времени эксплуатации водозабора  $t$ , расстояния  $r_n = \sqrt{x_n^2 + y_n^2}$  от центра водозабора до рассматриваемой водозаборной скважины с координатами  $x_n$  и  $y_n$ .

Для неограниченных напорных пластов без площадного питания

$$\lambda_n = \frac{r_n^2}{4at}. \quad (12)$$

При  $\frac{r_n^2}{4at} < 0,1$  интегральная показательная функция  $E_n(-\lambda_n)$  с необходимой практической точностью представляется в виде логарифма

$$E_n(-\lambda_n) = -\ln \frac{2,25at}{r_n^2}. \quad (13)$$

Окончательно из (11)–(13) имеем

$$\Delta S_{\text{ср.}n}(t) = \frac{\sum_{n=1}^N Q_n}{4\pi km} \ln \frac{2,25at}{r_n^2}. \quad (14)$$

Подставив (5), (7), (9) и (14) в (4), получим

$$S_n(t) = \frac{Q_n}{q_n} \left( e^{\beta t} + \frac{1}{(1-\alpha_n)} - 1 \right) + \frac{\sum_{n=1}^N Q_n}{4\pi km} \ln \frac{2,25at}{r_n^2}. \quad (15)$$

Подставив в уравнение (2) выражения (3) и (15), получим

$$a_n Q_n^2 - b_n Q_n + \frac{Q_n}{q_n} \left( e^{\beta t} + \frac{1}{1 - \alpha_n} - 1 \right) + \frac{\sum_{j=1}^N Q_j}{4\pi km} \ln \frac{2,25at}{r_n^2} + H_{ст.n} + Z_n + \Delta H_n - c_n = 0. \quad (16)$$

Если учитывать взаимодействие скважин по формуле Форхгеймера (10), уравнение (16) примет вид

$$a_n Q_n^2 - b_n Q_n + \frac{Q_n e^{\beta t}}{q_n} + \frac{\sum_{j=1}^p Q_j \ln \left( \frac{R_j}{r_{jn}} \right)}{2\pi km} + \frac{\sum_{j=1}^N Q_j}{4\pi km} \ln \frac{2,25at}{r_n^2} + H_{ст.n} + Z_n + \Delta H_n - c_n = 0. \quad (17)$$

В случае, когда не требуется выполнять прогнозный расчет водозабора (т. е.  $t = 0$ ), уравнения (16) и (17) принимают следующий вид:

$$a_n Q_n^2 - b_n Q_n + \frac{Q_n}{q_n(1 - \alpha_n)} + H_{ст.n} + Z_n + \Delta H_n - c_n = 0; \quad (18)$$

$$a_n Q_n^2 - b_n Q_n + \frac{Q_n}{q_n} + \frac{\sum_{j=1}^p Q_j \ln \left( \frac{R_j}{r_{jn}} \right)}{2\pi km} + H_{ст.n} + Z_n + \Delta H_n - c_n = 0. \quad (19)$$

Анализ уравнений (16)–(19) показывает, что чем меньше удельный дебит скважин  $q_n$  и больше расстояние от устья скважины до статического уровня  $H_n$ , тем больше понижение в скважине и дополнительный геометрический напор, преодолеваемый насосом, и, следовательно, выше удельные энергозатраты на подачу воды в резервуары. Это позволяет ранжировать все скважины водозабора по удельным энергозатратам и экономить электроэнергию [10].

Система уравнений вида (1) решается итерационными методами, определяются дебиты скважин, напоры в узлах сборного водовода. Затем надо выполнить проверку адекватности математической модели, а далее производится ее корректировка с учетом фактических значений напоров в узлах сборных водоводов и дебитов скважин.

*Пример.* Скважинный водозабор (рис. 1) представлен восьмью водозаборными скважинами, имеет разветвленную схему соединения сборных водоводов с двумя ветвями, подключен к водонапорной башне, находящейся на входе в водопроводную сеть города [11–13]. Скважи-

ны № 2, 3, 5 пробурены на днепровско-сожский водоносный комплекс, скважины № 4, 6, 7, 8, 9 – на альб-сеноманские отложения. Фактическое водопотребление населенного пункта  $Q_s = 4500 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Требуется на основе материалов обследования и комплексных расчетов проанализировать режим эксплуатации водозабора с учетом фактической интенсивности кольматажа скважин [14], определить межремонтный период его работы, осуществить подбор насосного оборудования.

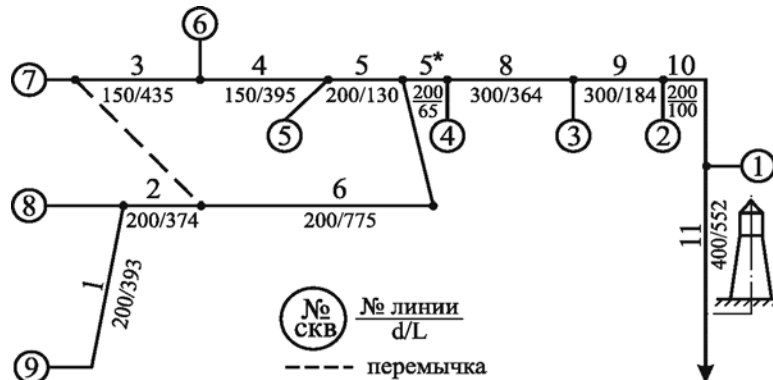


Рис. 1. Расчетная схема подключения скважин к сборному водоводу

Fig. 1. An estimated scheme of connecting wells to a prefabricated water conduit

Результаты обследования скважин представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты обследования скважин водозабора

The results of water intake wells survey

| Номер скважины | Удельный дебит при бурении $q_0$ , $\text{м}^2/\text{ч}$ | Удельный дебит при обследовании $q$ , $\text{м}^2/\text{ч}$ | Время эксплуатации $t_3$ , лет | Коэффициент старения $\beta$ | Геометрический напор $Z$ , м | Глубина статического уровня $H_{\text{ст}}$ , м | Длина водоподъемных труб $l$ , м | Длина линии подключения $l$ , м | Диаметр водоподъемных труб $d'$ , мм | Диаметр линии подключения $d$ , мм | Суммарный коэффициент снижения дебита $\sum \alpha$ |
|----------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 2              | 2                                                        | 1                                                           | 7                              | 0,041                        | 40                           | 17,5                                            | 66                               | 30                              | 75                                   | 75                                 | 0,10                                                |
| 3              | 1,57                                                     | 0,80                                                        | 21                             | 0,032                        | 39,5                         | 15,0                                            | 50                               | 30                              | 75                                   | 75                                 | 0,10                                                |
| 4              | 4,50                                                     | 3,00                                                        | 16                             | 0,025                        | 43,6                         | 38,7                                            | 66                               | 30                              | 100                                  | 100                                | 0,03                                                |
| 5              | 1,33                                                     | 0,78                                                        | 10                             | 0,053                        | 45,0                         | 16,0                                            | 67                               | 20                              | 100                                  | 100                                | 0,01                                                |
| 6              | 1,00                                                     | 0,60                                                        | 5                              | 0,100                        | 45,5                         | 40,0                                            | 83                               | 40                              | 75                                   | 75                                 | 0,04                                                |
| 7              | 1,50                                                     | 0,80                                                        | 5                              | 0,126                        | 46,4                         | 43,7                                            | 66                               | 150                             | 100                                  | 150                                | 0,10                                                |
| 8              | 1,90                                                     | 1,60                                                        | 3                              | 0,057                        | 49,5                         | 41,8                                            | 61                               | 10                              | 100                                  | 100                                | 0,10                                                |
| 9              | 3,70                                                     | 2,40                                                        | 3                              | 0,144                        | 52                           | 39                                              | 61                               | 393                             | 100                                  | 200                                | 0,05                                                |

Для каждой скважины осуществлялся предварительный подбор насосов графоаналитическим способом. Полученные расходы являлись предварительными для расчета системы нелинейных уравнений.

Порядок расчета имел следующий вид:

- на основе натурных данных, полученных при обследовании водозабора, составлялась система (1) нелинейных уравнений динамического равновесия водозабора вида (16) с учетом факторов кольматации скважин и их взаимного влияния; в уравнение для скважины № 9 потери напора подставлялись для участков 1–2–6–5\*–8–9–10–11; для скважины № 8 – для участков 2–6–5\*–8–9–10–11; для скважины № 7 – для участков 3–4–5–5\*–8–9–10–11; для скважины № 6 – для участков 4–5–5\*–8–9–10–11, при этом расходы на участках 5\*–8–9–10–11 при определении потерь напора включали подачи насосов скважин № 6, 7, 8, 9;

- составлялась программа расчета системы (1), ее решение осуществлялось на различные моменты времени с определением на каждом шаге по времени значений  $Q_n$ ,  $\Sigma Q_i$  и проверкой выполнения условия  $\Sigma Q_i > Q_s$ ;

- определялся по графику  $\Sigma Q_i = f(t)$  при  $\Sigma Q_i = Q_s = 4500 \text{ м}^3/\text{сут.}$  период  $T_s$  работы водозабора, который от момента обследования составил  $T_s = 32$  месяца (2,67 года) (рис. 2). Промежуток времени  $T_s$  можно условно считать межремонтным периодом работы водозабора, это значит, что до момента его окончания необходимо предусмотреть комплекс мероприятий по регенерации скважин, снизивших свой удельный дебит.

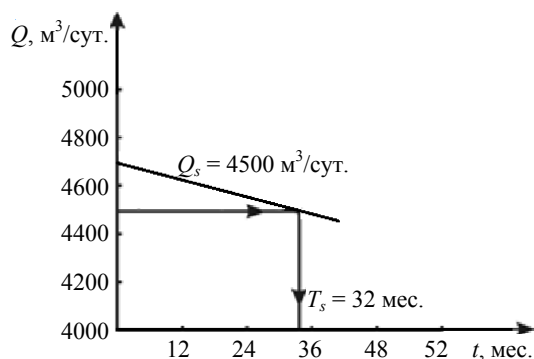


Рис. 2. Расчетный график изменения во времени суммарной производительности водозабора

Fig. 2. An estimated schedule of changes in the total water intake performance over time

Из данных рис. 2 следует, что суммарная производительность водозабора некоторое время после обследования превышает водопотребление населенного пункта, однако с ростом сопротивления фильтров скважин в результате кольматации происходит уменьшение удельного дебита скважин  $q(t)$  и возрастают понижения  $S(t)$ , что приводит к уменьшению производительности водозабора.

Расчетные данные по выбранному водоподъемному оборудованию представлены в табл. 2.

Таблица 2

Водоподъемное оборудование и понижения в скважинах  
Water-lifting equipment and depressions in wells

| Номер скважины | Марка насоса | $t = 0$                   |                |                | $t = 2,67$ года           |                |                |
|----------------|--------------|---------------------------|----------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------|
|                |              | $Q, \text{ м}^3/\text{ч}$ | $H, \text{ м}$ | $S, \text{ м}$ | $Q, \text{ м}^3/\text{ч}$ | $H, \text{ м}$ | $S, \text{ м}$ |
| 1              | 1ЭЦВ8-25-100 | 27,54                     | 94,80          | 30,35          | 26,62                     | 96,69          | 32,72          |
| 2              | 1ЭЦВ8-25-100 | 26,20                     | 97,53          | 36,40          | 25,40                     | 99,11          | 38,41          |
| 3              | ЭЦВ8-25-150  | 37,66                     | 100,38         | 12,94          | 37,55                     | 100,88         | 13,79          |
| 4              | 1ЭЦВ8-25-100 | 25,40                     | 99,09          | 32,85          | 24,06                     | 101,55         | 35,85          |
| 5              | ЭЦВ8-25-150  | 26,40                     | 145,30         | 45,88          | 24,21                     | 152,36         | 54,90          |
| 6              | ЭЦВ8-25-150  | 26,02                     | 146,68         | 36,14          | 22,91                     | 156,20         | 44,55          |
| 7              | ЭЦВ8-25-150  | 32,57                     | 122,67         | 22,88          | 31,90                     | 125,30         | 26,10          |
| 8              | ЭЦВ8-25-150  | 34,38                     | 115,10         | 15,08          | 33,08                     | 120,60         | 21,30          |

Алгоритм расчета режимов работы скважинных водозаборов с площадной схемой расположения скважин и кольцевой схемой соединения сборных водоводов. Изложение материала ведется на примере расчетов по предлагаемому алгоритму одного из скважинных водозаборов г. Минска. Обобщение этого материала на другие водозаборы с кольцевыми сборными водоводами достаточно очевидно для специалиста, но весьма громоздко для изложения.

Рассмотрим расчетную схему откачки воды из скважин группового водозабора с подачей в резервуар СОЖ (рис. 3).

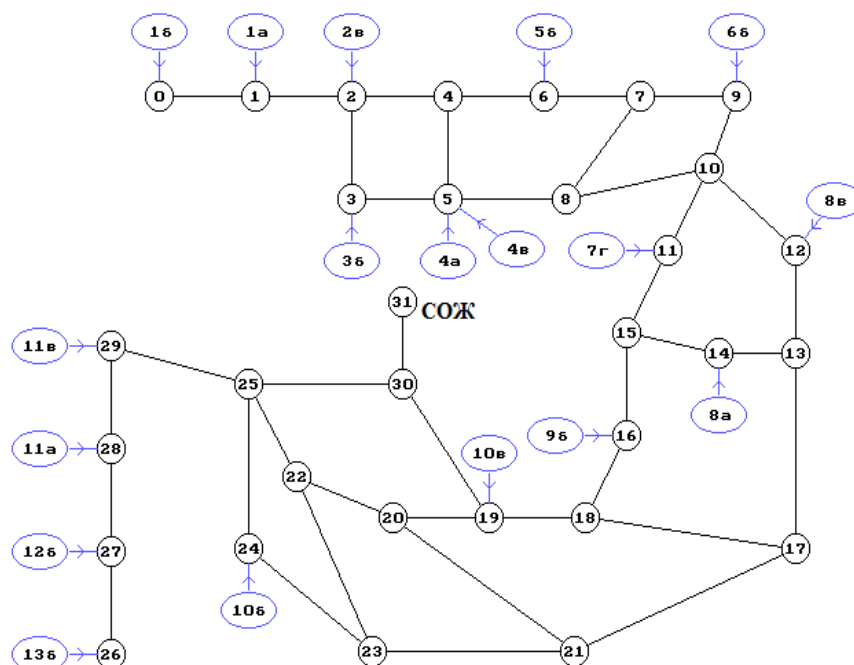


Рис. 3. Расчетная схема группового водозабора

Fig. 3. A group water intake estimated scheme

На рис. 3 кругами обозначены водопроводные колодцы, расположенные на сборном водоводе, ведущем к СОЖ. В дальнейшем будем их называть узлами водовода. Эллипсами обозначены 18 водозаборных скважин, подключенных к сборному водоводу в соответствующих узлах, их номера написаны внутри эллипсов. Как видно, схема соединения сборных водоводов имеет девять минимальных колец (т. е. не содержащих внутри себя других колец).

Гидравлический расчет группового водозабора столь сложной конфигурации должен проводиться как для системы с нефиксированными подачами воды, что требует выполнения следующих действий:

*во-первых*, учета баланса напоров потока в водоводе с включенным в него насосом, забирающим воду из  $n$ -й скважины водозабора (1), который описывается системой уравнений:

$$H(Q_n) = S_n + H_{\text{ст}_n} + Z_n + \Delta H_n, \quad n = 1, \dots, 18, \quad (20)$$

где  $H(Q_n)$  – напор насоса при извлекаемом расходе воды  $Q_n$ ;

*во-вторых*, учета баланса расходов в узлах по всем участкам сборного водовода, который описывается системой уравнений:

$$Q_m + \sum_{k=1}^{n_m} \pm q_{mk} = 0, \quad m = 1, \dots, 31, \quad (21)$$

$m$  – число узлов сборного водовода;  $Q_m$  – подача воды в рассматриваемый узел подключенной к нему скважиной (если таковой нет, то считаем  $Q_m = 0$ );  $n_m$  – число сходящихся в данном узле линий сборного водовода;  $\pm q_{mk}$  – расходы воды в линиях, примыкающих к данному узлу, с учетом знаков (при подводе к узлу – знак «плюс», при отводе – знак «минус»).

Под словами «расчет водозабора» понимается задача определения таких извлекаемых расходов воды  $Q_n$  из скважин и таких расходов воды  $\pm q_{mk}$  на участках сборного водовода, чтобы выполнялись системы уравнений (20) и (21) для существующих параметров скважинного водозабора (диаметр, длина и материал труб, характеристики насосов, параметры скважин и т. д.).

*Определение расходов воды в линиях водовода при известных расходах в скважинах.* Отметим, что если известны значения  $Q_m$  в левых частях системы уравнений (21), то эта система является автономной, т. е. не зависящей от системы (20). Но система уравнений (21) для рассматриваемого сборного водовода даже при известных расходах  $Q_m$  в узлах имеет бесконечное множество решений, что связано с наличием колец на водоводе. Это следует из известных теорем линейной алгебры, а также подтверждается дальнейшими рассуждениями.

Чтобы избежать ситуации неопределенности, мы потребовали выполнения на кольцевых участках сборного водовода естественного условия: если из одного узла  $A$  вода может прийти в узел  $B$  двумя различными путями (при этом подразумевается, что для каждого пути направления движения воды для соседних участков совпадают), то суммы потерь напора по этим путям должны быть равны. Например, из узла 2 в узел 4 можно

попасть (рис. 3) либо по пути 2–4, либо по пути 2–3–5–4. Слова о совпадении направлений движения поясним так: говорим, что направления движения по участку  $m-n$  и по соседнему участку  $n-k$  совпадают, если по первому из них вода втекает в узел  $n$ , а по другому – вытекает из этого узла.

Для математического описания этих условий введем обозначения:  $q_{k,m}$  – алгебраический (т. е. с учетом знака) расход воды на простом участке  $k-m$  водовода. Слова «простой участок» означают, что между узлами с номерами  $k$  и  $m$  нет других узлов. Если значение  $q_{k,m}$  положительное, то движение воды происходит в сторону уменьшения расстояния до СОЖ, и в противоположную сторону – для отрицательного значения  $q_{k,m}$ . Например, для рассматриваемого водовода при  $q_{22,25} > 0$  движение воды происходит от узла 22 к узлу 25, а при  $q_{22,25} < 0$  – от узла 25 к узлу 22.

Потери напора  $\Pi_{k,m}(q)$  на участке  $k-m$  считаем с учетом знака расхода  $q$  на этом участке, т. е.  $\Pi_{k,m}(q) = q^2 G_{k,m}$ , если  $q > 0$ , и  $\Pi_{k,m}(q) = -q^2 G_{k,m}$ , если  $q < 0$ . Здесь  $G_{k,m}$  – сумма коэффициентов гидравлического сопротивления (КГС) участков сборного водовода от  $k$ -го до  $m$ -го узла.

Теперь вводим дополнительные неизвестные по количеству минимальных колец на водоводе и составляем для них уравнения согласно требованиям, описанным выше. На рассматриваемом водозаборе имеем девять минимальных колец (рис. 3) и для них вводим переменные:  $x_1$  – расход на участке 2–3;  $x_2$  – то же на участке 4–5;  $x_3$  – то же на участке 7–8;  $x_4$  – то же на участке 10–11;  $x_5$  – то же на участке 15–14;  $x_6$  – то же на участке 17–18;  $x_7$  – то же на участке 20–21;  $x_8$  – то же на участке 22–23;  $x_9$  – расход на участке 19–30. Надо отметить, что если найдем значения этих переменных, то, используя систему (21) и известные значения расходов  $Q_m$ , определим все нужные расходы  $q_{k,m}$  на участках водовода. Кстати, это как раз и подтверждает, что система (21) имеет бесконечно много решений.

Для неизвестных  $x_m$  составляем систему уравнений согласно требованиям баланса потерь, описанным ранее. Например, используя введенные обозначения и систему (21), для исследуемого водовода имеем (ниже приведены уравнения для двух минимальных колец, для остальных семи – аналогично):

$$\begin{aligned} & \text{– для кольца 2–3–5–4: } \Pi_{2,4}(\bar{Q}_{0,2} - x_1) + \Pi_{4,5}(x_2) = \Pi_{2,3}(x_1) + \Pi_{3,5}(Q_{36} + x_1); \\ & \text{– для кольца 4–6–7–8–5: } \Pi_{4,6}(\bar{Q}_{0,2} - x_1 - x_2) + \Pi_{6,7}(\bar{Q}_{0,6} - x_1 - x_2) + \Pi_{7,8}(x_3) = \\ & = \Pi_{4,5}(x_2) + \Pi_{3,5}(\bar{Q}_{3,8} + x_1 + x_2), \end{aligned}$$

где  $\bar{Q}_{0,2} = Q_{16} + Q_{1a} + Q_{2b}$ ;  $\bar{Q}_{0,6} = \bar{Q}_{0,2} + Q_{56}$ ;  $\bar{Q}_{3,8} = Q_{36} + Q_{4a} + Q_{4b}$  (напомним, что к узлу 5 подключены две скважины). Обозначение  $Q_{имя}$  указывает на расход в скважине с соответствующим наименованием.

Полученную систему из  $m$  ( $m$  – количество минимальных колец водовода) нелинейных уравнений можно решить методом итераций, если разумно представить ее в виде  $\bar{X} = F(\bar{X})$ , где  $\bar{X}$  – столбец неизвестных, причем в качестве нулевого приближения можно взять нулевые значения

расходов  $x_m$ . Перед началом каждой следующей итерации надо делать пересчет КГС на простых участках с учетом скоростей на них (определяются полученной на текущей итерации величиной расхода на участке).

Для решения такой конкретной задачи для данного водозабора с точностью до  $10^{-6}$  потребовалось около 10 итераций.

Отметим, что найденное распределение расходов  $q_{k,m}$  на простых участках водовода обладает важным математическим свойством: для любого узла алгебраическая (с учетом знаков) сумма потерь при движении до СОЖ не зависит от пути движения по водоводу. Это играет важную роль при рассмотрении (20).

*Определение добываемых расходов воды из скважин.* Предположим, что для некоторого набора расходов  $Q_n^{\text{стар}}$ ,  $n = 1, \dots, 18$ , мы выполнили вычисления, как это описано выше, и нашли распределение расходов  $q_{k,m}$  на простых участках водовода. Для дальнейших выкладок надо подробно расписать (20). Для этого оговорим обозначения (далее  $n = 1, \dots, 18$  – номер скважины):

$a_n$ ,  $b_n$  и  $c_n$  – коэффициенты функции напора (3) насоса  $n$ -й скважины в зависимости от извлекаемого расхода. Они определяются из паспорта насоса или экспериментально;

$A_n$  – сумма удельных сопротивлений водоподъемных труб и линий подключения скважины к сборному водоводу,  $\text{с}^2/\text{м}^5$ ;

$$B_n = \frac{1}{q_n} \left( e^{\beta t} + \frac{1}{1 - \alpha_n} - 1 \right) - \text{коэффициент, позволяющий учесть старение}$$

скважины и ее взаимодействие с другими скважинами;

$C_n = H_{\text{ст}_n} + Z_n$ , где  $Z_n = \nabla_{\text{сож}} - \nabla_n + P_{\text{сож}}$  – геометрический напор,  $\nabla_{\text{сож}}$  – отметка пола СОЖ, м;  $\nabla_n$  – то же устья скважины, м;  $P_{\text{сож}}$  – требуемый напор на СОЖ, м;

$G_n$  – алгебраическая сумма потерь на участке водовода от скважины до СОЖ, м, найденная по распределению расходов  $q_{k,m}$  на простых участках водовода.

Отметим, что значения удельного сопротивления для труб рассчитываются с использованием таблиц Шевелева [15] по диаметрам и материалам труб и с учетом поправочных коэффициентов, зависящих от скорости протекания воды по трубе, т. е. от текущих расходов, проходящих по трубе.

С учетом оговоренных обозначений (20) можно переписать в следующем виде:

$$(A_n + a_n)Q_n^2 + (B_n - b_n)Q_n + (C_n - c_n) + G_n = 0, n = 1, \dots, 18. \quad (22)$$

Применим (22) для нахождения новых значений расходов скважин  $Q_n^{\text{нов}}$ ,  $n = 1, \dots, 18$ . Для этого используем формулу корней квадратного уравнения (с минусом перед корнем из дискриминанта). Если дискрими-

нант получается отрицательным, это означает неправильный подбор насосов или их большой износ.

Опишем алгоритм расчетов параметров работы скважинного водозабора.

0-й шаг. Задаем начальные приближения для столбца расходов скважин  $\bar{Q}^0$ . Можно взять нулевые значения.

1-й шаг. Если значения столбца для  $i$ -го приближения  $\bar{Q}^i$  найдены, то, используя их, решаем систему (21) с максимально высокой точностью и находим алгебраические значения расходов  $q_{k,m}$  на простых участках водовода. Применяя эти значения, пересчитываем необходимые КГС и алгебраические суммы потерь  $G_n$  по водоводу для (22) (напомним, что для найденных значений расходов на простых участках  $q_{k,m}$  суммы  $G_n$  не зависят от пути движения от скважины до СОЖ).

2-й шаг. Используя (22), находим  $(i + 1)$ -е приближение  $\bar{Q}^{i+1}$  и норму отклонения  $\Delta_i = \|\bar{Q}^{i+1} - \bar{Q}^i\| = \sqrt{\sum (Q_n^{i+1} - Q_n^i)^2}$ . Если отклонение меньше требуемой точности, заканчиваем работу, так как найдены нужные значения расходов  $Q_n$  и  $q_{k,m}$ , удовлетворяющие (20) и (21); в противном случае возвращаемся к шагу 1.

Нетрудно увидеть, что изложенный алгоритм годится и для водозаборов, рассмотренных выше. Только в этом случае при отсутствии колец (21) имеет однозначное решение, которое находится простым пересчетом по водоводам, начиная с дальних участков. А в (22) коэффициенты  $G_n$  представляют собой сумму потерь, вычисленную по однозначному пути, соединяющему скважину и СОЖ, и найденным расходам  $q_{k,m}$  на простых участках.

На рис. 4 приведены результаты расчетов, выполненных с помощью этого алгоритма, для водозабора «Петровщина» при десяти включенных скважинах.

В табл. 3 представлены для сравнения реальные извлекаемые и расчетные расходы, указанные на рис. 4. Замеры извлекаемых расходов выполнены с привлечением системы АСУ водозабора.

Можно констатировать достаточно хорошее соответствие математической модели и выполненных замеров. Вместе с тем, поскольку по трем скважинам имеется завышение прогноза более чем на 4 %, был сделан повторный расчет с увеличением в исходных данных удельных сопротивлений для труб линий подключения трех скважин: 6б, 10б и 10в. В результате для этих скважин относительная ошибка оказалось в пределах 1,5 %, причем результаты улучшились и для скважин 1б и 7г. Относительная ошибка для суммарного расхода уменьшилась до 0,9 % – более чем в два раза. Это позволяет сделать заключение, что трубы линий подключения указанных трех скважин находятся не в лучшем состоянии и требуют по крайней мере очистки.

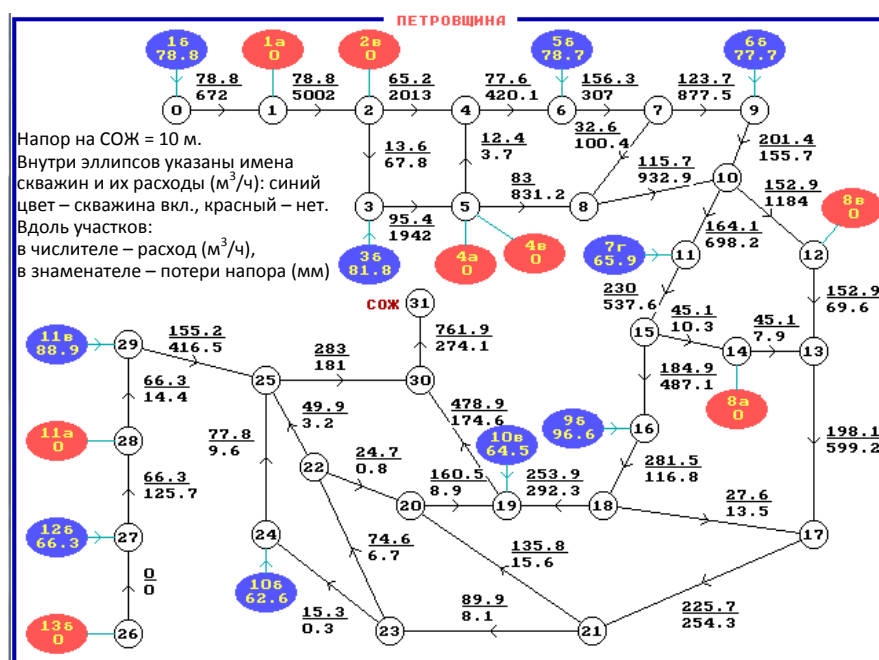


Рис. 4. Результаты расчета по (20), (21) с десятью работающими скважинами

Fig. 4. The calculation results for (20), (21) with ten operating wells

Таблица 3

## Реальные и расчетные расходы скважин (рис. 4)

## Comparison of real and estimated costs (Fig. 4)

| Название скважины                 | 16   | 36    | 56    | 66   | 7Г     | 96    | 106  | 10в  | 126  | 11в  | Сумма |
|-----------------------------------|------|-------|-------|------|--------|-------|------|------|------|------|-------|
| Извлекаемый расход, м³/ч          | 79,6 | 80,00 | 78,60 | 74,4 | 66,000 | 96,00 | 60,5 | 59,5 | 64,7 | 88,0 | 747,3 |
| Отклонение расчета от опыта, м³/ч | -0,8 | +1,80 | +0,10 | +3,3 | -0,100 | +0,60 | +4,0 | +3,1 | +1,6 | +0,9 | +14,5 |
| Относительная ошибка, %           | 1,0  | 2,25  | 0,01  | 4,4  | 0,015  | 0,06  | 6,6  | 5,2  | 2,4  | 1,0  | 1,9   |

Сказанное выше подтверждает, что качественное моделирование работы водозаборов с использованием приведенного алгоритма возможно только в случае наличия достоверных исходных данных относительно работы насосов, состояния труб линии подключения скважин к водоводу и труб самого водовода. В частности, анализ текущего состояния водозабора «Петровщина» потребовал внести коррективы в сторону увеличения в расчет удельных сопротивлений для труб линий подключения многих скважин. Кроме того, особенности конкретного водозабора требуют учета дополнительных потерь в правой части уравнения (20). К примеру, наличие в схеме водозабора «Петровщина» узла 10, где сходятся две линии (рис. 3, 4), потребовало прибавить к коэффициенту  $C_n$  в системе уравнений (22) коэффициент  $P$  (для скважин, расположенных выше этого узла) для учета дополнительных потерь напора, которые зависят от суммарного расхода, приходящего на этот узел. Значения этих дополнительных потерь рассчитывались исходя из опытных данных, на основании которых была

получена эмпирическая формула потерь  $P = P(Q)$ , где  $Q$  – приходящий на узел 10 расход воды.

## ВЫВОДЫ

1. Уточнены методики расчета нелинейных водозаборов с несколькими ветвями скважин, с площадной схемой расположения скважин и кольцевой схемой соединения сборных водоводов. Уравнения для скважин системы динамического равновесия водозабора записаны с учетом дополнительных понижений, связанных со сработкой запасов подземных вод, кольматажем фильтров скважин во времени и взаимовлиянием скважин. Решение системы позволяет определить производительность каждой скважины при любом сочетании и количестве работающих скважин, правильно подобрать насосное оборудование, а также выполнить прогнозный расчет снижения производительности водозабора с учетом кольматажа и сработки запасов.

2. Разработаны алгоритмы расчета подобных водозаборов, которые могут быть использованы при создании математических моделей водозаборов любой конфигурации, проектируемых и находящихся в эксплуатации. Рассмотрены примеры расчетов скважинных водозаборов с разветвленной и кольцевой схемами подключения скважин к сборным водоводам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование водозаборов подземных вод / А. И. Арцев [и др.]. М.: Стройиздат, 1976. 292 с.
2. Гаврилко, В. М. Фильтры буровых скважин / В. М. Гаврилко, В. С. Алексеев. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1985. 334 с.
3. Пособие по проектированию сооружений для забора подземных вод (к СНиП 2.04.02–84) / ВНИИВОДГЕО Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1989. 272 с.
4. Плотников, Н. А. Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод / Н. А. Плотников, В. С. Алексеев. М.: Стройиздат, 1990. 256 с.
5. Старинский, В. П. Водозаборные и очистные сооружения коммунальных водопроводов: учеб. пособие / В. П. Старинский, Л. Г. Михайлик. Минск: Выш. шк., 1989. 269 с.
6. Гуринович, А. Д. Питьевое водоснабжение из подземных источников: проблемы и решения / А. Д. Гуринович. Минск: Технопринт, 2001. 305 с.
7. Скважинные водозаборы. Правила проектирования: ТКП 45-4.01-199–2010.
8. Гаврилко, В. М. Опыт эксплуатации скважин, оборудованных фильтрами из пористой керамики / В. М. Гаврилко, Н. Д. Бессонов // Труды ВНИИВодГео. 1966. Вып. 13. С. 8–10.
9. Дубровский, В. В. Справочник по бурению и оборудованию скважин на воду / В. В. Дубровский, М. М. Керченский, В. И. Плохов. М.: Недра, 1972. 512 с.
10. Здор, Г. Н. Автоматическое управление группой насосных агрегатов с целью снижения затрат электроэнергии / Г. Н. Здор, А. В. Сеницын, О. А. Аврутин // Энергетика. Известия высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 1. С. 54–66. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-54-66>.
11. Ивашечкин, В. В. Прогноз периода стабильной работы скважинных водозаборов на основе результатов обследования / В. В. Ивашечкин, А. Н. Кондратович, Г. К. Добриян // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. 2005. Т. 17, № 7. С. 199–209.
12. Ивашечкин, В. В. К расчету межремонтных периодов работы скважинных водозаборов с учетом старения скважин / В. В. Ивашечкин, А. М. Шейко // Вестник БНТУ. 2006. № 5. С. 5–10.
13. Ивашечкин, В. В. Прогноз снижения удельного дебита скважин в процессе эксплуатации / В. В. Ивашечкин, А. М. Шейко, Э. И. Михневич // Мелиорация. 2012. № 2. С. 33–43.

14. Иванова, И. Е. Теоретические исследования процесса выщелачивания кольматанта в гравийной обсыпке фильтра скважины при использовании установки для реверсивно-реагентной регенерации / И. Е. Иванова, В. В. Ивашечкин, В. В. Верemenюк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 1. С. 80–92. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-80-92>.
15. Шевелев, Ф. А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: справ. пособие / Ф. А. Шевелев, А. Ф. Шевелев. М.: Бастет, 2016. 428 с.

Поступила 10.04.2020    Подписана в печать 16.06.2020    Опубликована онлайн 30.11.2020

#### REFERENCES

1. Artsev A. I., Bochever F. M., Lapshin N. N., Oradovskaya O. E., Khokhlatov E. M. (1976) *Design of Groundwater Intakes*. Moscow, Stroiizdat Publ. 292 (in Russian).
2. Gavrilko V. M., Alekseev V. S. (1985) *Drill Well Filters*. 3<sup>rd</sup> ed. Moscow, Nedra Publ. 334 (in Russian).
3. All-Union Research Institute of Water Supply, Sewerage, Hydraulic Constructions and Engineering Hydrogeology ("VODGEO" AURI) of the USSR State Construction Committee (1989) *A Guide for the Design of Constructions for Groundwater Intake (to SNiP 2.04.02–84)*. Moscow, Stroiizdat Publ. 272 (in Russian).
4. Plotnikov N. A., Alekseev V. S. (1990) *Design and Operation of Groundwater Intakes*. Moscow, Stroiizdat Publ. 256 (in Russian).
5. Starinsky V. P., Mikhailik L. G. (1989) *Water Intake and Treatment Facilities of Municipal Water Supply Systems*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 269 (in Russian).
6. Gurinovich A. D. (2001) *Drinking Water Supply from Underground Sources: Problems and Solutions*. Minsk, Technoprint Publ. 305 (in Russian).
7. ТКР 45-4.01-199–2010 *Borehole Water Intakes. Design Rules* (in Russian).
8. Gavrilko V. M., Bessonov N. D. (1966) Operational Experience of Wells Equipped with Porous Ceramic Filters. *Trudy VNIIVodGeo [Transactions of All-Union Research Institute of Water Supply, Sewerage, Hydraulic Constructions and Engineering Hydrogeology of the USSR State Construction Committee]*, (13), 8–10 (in Russian).
9. Dubrovskii V. V., Kerchenskii M. M., Plokhov V. I. (1972) *Drilling and Equipment for Water Wells Guide*. Moscow, Nedra Publ. 512 (in Russian).
10. Zdor G. N., Sinitsyn A. V., Avrutin O. A. (2017) Pump Group Automatic Control for Reducing its Energy Consumption. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (1), 54–66. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-54-66> (in Russian).
11. Ivashechkin V. V., Kondratovich A. N., Dobriyan G. K. (2005) Forecast of the Period of Stable Operation of Borehole Water Intakes Based on the Survey Results. *Chrezvychainye Situatsii: Preduprezhdenie i Likvidatsiya [Emergencies: Prevention and Response]*, 17 (7), 199–209 (in Russian).
12. Ivashechkin V. V., Sheiko A. M. (2006) Towards the Calculation of the Overhaul Periods of Borehole Water Intakes in View of Wells Deterioration. *Vestnik BNTU = Messenger of BNTU*, (5), 5–10. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-0-5-5-10> (in Russian).
13. Ivashechkin V. V., Sheiko A. M., Mikhnevich E. I. (2012) Forecast for a Decrease in the Specific Flow Rate of Wells in the Process of Operation. *Melioratsiya [Land Reclamation]*, (2), 33–43 (in Russian).
14. Ivanova I. E., Ivashechkin V. V., Veremenyuk V. V. (2018) Theoretical Studies of the Leaching Process of the Mudding Element in the Gravel Package of the Well Filter Using the Unit for Reverse-Reagent Regeneration. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (1), 81–92. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-80-92> (in Russian).
15. Shevelev F. A., Shevelev A. F. (2016) *Tables for the Hydraulic Calculation of Water Pipes*. Moscow, Bastet Publ. 428 (in Russian).

Received: 10 April 2020

Accepted: 16 June 2020

Published online: 30 November 2020

## ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ «ЭНЕРГЕТИКА» в 2020 г.

### I. ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

#### ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| <b>Esman A. K., Zykov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K.</b> Simulation of Thin-Film Solar Cells with a CuInSe <sub>2</sub> Chalcopyrite Structure<br>(Есман А. К., Зыков Г. Л., Потачиц В. А., Кулешов В. К. Моделирование тонкопленочных солнечных элементов со структурой халькопирита CuInSe <sub>2</sub> ) . . . . | 1 |
| <b>Марченко О. В., Соломин С. В.</b> Конкурентоспособность солнечных и ветровых электростанций в странах СНГ . . . . .                                                                                                                                                                                                      | 4 |
| <b>Нгуен Т. Н., Сизов В. Д., Ву М. Ф., Ку Т. Т. Х.</b> Оценка эффективности работы солнечной электростанции на крыше здания в Ханое . . . . .                                                                                                                                                                               | 1 |
| <b>Pysmenná U. Ye., Trypolska G. S.</b> Maintaining the Sustainable Energy Systems: Turning from Cost to Value<br>(Письменная У. Е., Трипольская Г. С. Обеспечение устойчивого развития энергетических систем: переход от стоимости к ценности . . . . .                                                                    | 1 |
| <b>Pysmenná U. Ye., Trypolska G. S.</b> Sustainable Energy Transitions: Overcoming Negative Externalities<br>(Письменная У. Е., Трипольская Г. С. Устойчивые энергетические трансформации: нивелирование негативных экстерналий) . . . . .                                                                                  | 4 |

#### ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| <b>Анищенко В. А., Писарук Т. В.</b> Контроль достоверности измерений нагрузки промышленного предприятия на основе анализа динамики ее изменений . . . . .                                                                                                                                                                               | 5 |
| <b>Баламетов А. Б., Халилов Э. Д.</b> Моделирование режимов электрических сетей на основе уравнений установившегося режима и теплового баланса . . . . .                                                                                                                                                                                 | 1 |
| <b>Belsky A. A., Skamyin A. N., Vasilkov O. S.</b> The Use of Hybrid Energy Storage Devices for Balancing the Electricity Load Profile of Enterprises<br>(Бельский А. А., Скамыин А. Н., Васильков О. С. Применение гибридных накопителей электроэнергии для выравнивания графика нагрузки предприятий) . . . . .                        | 3 |
| <b>Бладыко Ю. В.</b> Механический расчет гибких токопроводов при наличии горизонтальных сосредоточенных нагрузок . . . . .                                                                                                                                                                                                               | 6 |
| <b>Бладыко Ю. В.</b> Механический расчет гибких токопроводов пролетов с разными натяжными гирляндами изоляторов . . . . .                                                                                                                                                                                                                | 1 |
| <b>Бладыко Ю. В.</b> Механический расчет гибких токопроводов с сосредоточенными нагрузками . . . . .                                                                                                                                                                                                                                     | 2 |
| <b>Elzein I., Petrenko Yu.</b> An Adaptive Maximum Power Output Sustaining System for a Photovoltaic Power Plant Based on a Robust Predictive Control Approach<br>(Элзейн И., Петренко Ю. Адаптивная система обеспечения максимальной выходной мощности фотоэлектрической станции на основе робастного прогнозного управления) . . . . . | 5 |
| <b>Зализный Д. И.</b> Модель фотоэлектрического модуля для библиотеки SimPowerSystems пакета MatLab/Simulink . . . . .                                                                                                                                                                                                                   | 6 |
| <b>Каченя В. С., Ломан М. С.</b> Формирование мгновенных дифференциальных и тормозных токов дифференциальной защиты сборных шин . . . . .                                                                                                                                                                                                | 5 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| <b>Протосовицкий И. В., Забелло Е. П., Прищепов М. А., Дайнеко В. А.</b> Обеспечение надежности и эффективности электроэнергетики сельскохозяйственной отрасли Республики Беларусь в современных условиях .....                                                                                                                                                          | 2 |
| <b>Романюк Ф. А., Румянцев В. Ю., Румянцев Ю. В., Дерюгина Е. А., Климович П. И.</b> Исследование блокировки токовой защиты электроустановок с трансформаторами .....                                                                                                                                                                                                    | 6 |
| <b>Романюк Ф. А., Румянцев В. Ю., Румянцев Ю. В., Дерюгина Е. А.</b> Снижение влияния изменений частоты на формирование ортогональных составляющих входных сигналов релейной защиты .....                                                                                                                                                                                | 1 |
| <b>Романюк Ф. А., Румянцев В. Ю., Румянцев Ю. В., Каченя В. С.</b> Формирование ортогональных составляющих входных сигналов в микропроцессорных защитах .....                                                                                                                                                                                                            | 4 |
| <b>Tytiuk V. K., Baranovskaya M. L., Chornyi O. P., Burdilnaya E. V., Kuznetsov V. V., Bogatyriov K. N.</b> Online-Identification of Electromagnetic Parameters of an Induction Motor<br>(Тытюк В. К., Барановская М. Л., Черный А. П., Бурдильная Е. В., Кузнецов В. В., Богатырев К. Н. Онлайн-идентификация электромагнитных параметров асинхронного двигателя) ..... | 5 |
| <b>Фираго Б. И., Александровский С. В.</b> Исследование переходных процессов электропривода с синхронным двигателем с постоянными магнитами при линейном изменении частоты питающего напряжения .....                                                                                                                                                                    | 3 |
| <b>Фурсанов М. И., Сазонов П. А.</b> Специализированные мобильные приложения как средство оптимизации системы энергоснабжения Республики Беларусь .....                                                                                                                                                                                                                  | 2 |

## ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

|                                                                                                                                                                                                                                                                                         |   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| <b>Бежан А. В.</b> Повышение эффективности систем теплоснабжения за счет внедрения ветроэнергетических установок .....                                                                                                                                                                  | 3 |
| <b>Василевич С. В., Малько М. В., Дегтерев Д. В., Асадчий А. Н.</b> Расчетное исследование выхода твердых продуктов пиролиза древесины при повышенном давлении .....                                                                                                                    | 3 |
| <b>Гречихин Л. И., Гутковский А. И.</b> Воздушный тепловой насос в ветроэнергетике .....                                                                                                                                                                                                | 3 |
| <b>Дмитриев С. М., Герасимов А. В., Добров А. А., Доронков Д. В., Пронин А. Н., Рязанов А. В., Солнцев Д. Н., Хробостов А. Е.</b> Исследование локальной гидродинамики теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР .....                                                      | 2 |
| <b>Iokova I. L., Kalinichenko A. S.</b> Calculation of Heat Exchange on the Surface of a Flexible Heat Exchanger for Use in Mobile Hospitals<br>(Иокова И. Л., Калининченко А. С. Расчет теплообмена на поверхности гибкого теплообменника для применения в мобильных госпиталях) ..... | 1 |
| <b>Исаков В. Г., Абрамова А. А., Дягелев М. Ю.</b> Энергетическая эффективность малого биореактора в различных климатических зонах .....                                                                                                                                                | 4 |
| <b>Кравченко В. В., Цыганкова С. Д.</b> Влияние коррозии конструкционных материалов твэлов на радиационную безопасность энергоблоков АЭС с ВВЭР .....                                                                                                                                   | 1 |
| <b>Кулаков Г. Т., Артёменко К. И.</b> Синтез котельных регуляторов системы автоматического управления мощностью энергоблоков .....                                                                                                                                                      | 3 |
| <b>Мариненко В. И., Кулинич В. С.</b> Солнечные коллекторы на основе медных двухфазных термосифонов .....                                                                                                                                                                               | 5 |
| <b>Овсянник А. В., Ключинский В. П.</b> Термодинамический анализ озонобезопасных низкотемпературных рабочих тел для турбодетандерных установок .....                                                                                                                                    | 6 |
| <b>Паневник Д. А., Паневник А. В.</b> Повышение энергоэффективности использования скважинных струйных насосов .....                                                                                                                                                                     | 5 |
| <b>Сафаров Ж. Э., Султанова Ш. А., Дадаев Г. Т.</b> Разработка гелиоаккумуляционной сушильной установки на основе теоретических исследований аккумуляции солнечной энергии .....                                                                                                        | 2 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                |   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| <b>Солодов В. Г., Конев В. А.</b> Анализ эффективности вариантов выхлопного отсека паровой турбины .....                                                                                                                                                       | 4 |
| <b>Сорока Б. С., Горупа В. В.</b> Экологические характеристики современных систем бытового использования топлива. Часть 1 .....                                                                                                                                | 4 |
| <b>Сорока Б. С., Горупа В. В.</b> Экологические характеристики современных систем бытового использования топлива. Часть 2. Образование вредных веществ при сжигании природного газа в атмосферных горелках: экспериментальные исследования .....               | 5 |
| <b>Сухоцкий А. Б., Маршалова Г. С., Данильчик Е. С.</b> Особенности расчета лучистой составляющей теплового потока горизонтального пучка из оребренных труб с вытяжной шахтой .....                                                                            | 4 |
| <b>Тиунов С. В., Скрыпник А. Н., Маршалова Г. С., Гуреев В. М., Попов И. А., Кадыров Р. Г., Чорный А. Д., Жукова Ю. В.</b> Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик оребренных плоских труб аппарата воздушного охлаждения масла ..... | 2 |
| <b>Фархадзаде Э. М., Мурадалиев А. З., Фарзалиев Ю. З., Ашурова У. К.</b> Внутренний бенчмаркинг тепловых электростанций электроэнергетических систем                                                                                                          | 6 |
| <b>Фархадзаде Э. М., Мурадалиев А. З., Рафиева Т. К., Рустамова А. А.</b> Достоверность линейной взаимосвязи технико-экономических показателей энергоблоков 300 МВт тепловых электростанций .....                                                              | 2 |
| <b>Ярмольчик Ю. П., Шрёгер Р., Хаберфельнер Х., Пихлер М., Костич Д., Мороз Г. В.</b> Комбинированное сжигание потоков различных промышленных отходов в топках котлов. Часть 1 .....                                                                           | 3 |
| <b>Ярмольчик Ю. П., Шрёгер Р., Хаберфельнер Х., Пихлер М., Костич Д., Мороз Г. В.</b> Комбинированное сжигание потоков различных промышленных отходов в топках котлов. Часть 2 .....                                                                           | 6 |

#### ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

|                                                                                                                                                                            |   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| <b>Веременюк В. В., Ивашечкин В. В., Крицкая В. И.</b> Математические модели скважинных водозаборов с разветвленной и кольцевой схемами соединения сборных водоводов ..... | 6 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|

## II. ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абрамова А. А., 4  
 Александровский С. В., 3  
 Анищенко В. А., 5  
 Артёменко К. И., 3  
 Асадчий А. Н., 3  
 Ашурова У. К., 6  
 Баламетов А. Б., 1  
 Барановская М. Л., 5  
 Бежан А. В., 3  
 Бельский А. А., 3  
 Бладыко Ю. В., 1, 2, 6  
 Богатырев К. Н., 5  
 Бурдильная Е. В., 5  
 Василевич С. В., 3  
 Васильков О. С., 3  
 Веремёнук В. В., 6  
 Ву М. Ф., 1  
 Герасимов А. В., 2  
 Горупа В. В., 4, 5  
 Гречихин Л. И., 3  
 Гуреев В. М., 2  
 Гутковский А. И., 3  
 Дадаев Г. Т., 2  
 Дайнеко В. А., 2  
 Данильчик Е. С., 4  
 Дегтеров Д. В., 3  
 Дерюгина Е. А., 1, 6  
 Дмитриев С. М., 2  
 Добров А. А., 2  
 Доронков Д. В., 2  
 Дягелев М. Ю., 4  
 Есман А. К., 1  
 Жукова Ю. В., 2  
 Забелло Е. П., 2  
 Зализный Д. И., 6  
 Зыков Г. Л., 1  
 Ивашечкин В. В., 6  
 Иокова И. Л., 1  
 Исаков В. Г., 4  
 Кадыров Р. Г., 2  
 Калининченко А. С., 1  
 Каченя В. С., 4, 5  
 Климкович П. И., 6  
 Ключинский В. П., 6  
 Конев В. А., 4  
 Костич Д., 3, 6  
 Кравченко В. В., 1  
 Крицкая В. И., 6  
 Ку Т. Т. Х., 1  
 Кузнецов В. В., 5  
 Кулаков Г. Т., 3  
 Кулешов В. К., 1  
 Кулинич В. С., 5  
 Ломан М. С., 5  
 Малько М. В., 3  
 Мариненко В. И., 5  
 Марченко О. В., 4  
 Маршалова Г. С., 2, 4  
 Мороз Г. В., 3, 6  
 Мурадалиев А. З., 2, 6  
 Нгуен Т. Н., 1  
 Овсянник А. В., 6  
 Паневник А. В., 5  
 Паневник Д. А., 5  
 Петренко Ю., 5  
 Писарук Т. В., 5  
 Письменная У. Е., 1, 4  
 Пихлер М., 3, 6  
 Попов И. А., 2  
 Потачиц В. А., 1  
 Прищепов М. А., 2  
 Пронин А. Н., 2  
 Протосовицкий И. В., 2  
 Рафиева Т. К., 2  
 Романюк Ф. А., 1, 4, 6  
 Румянцев В. Ю., 1, 4, 6  
 Румянцев Ю. В., 1, 4, 6  
 Рустамова А. А., 2  
 Рязанов А. В., 2  
 Сазонов П. А., 2  
 Сафаров Ж. Э., 2  
 Сизов В. Д., 1  
 Скамьин А. Н., 3  
 Скрыпник А. Н., 2  
 Солнцев Д. Н., 2  
 Солодов В. Г., 4  
 Соломин С. В., 4  
 Сорока Б. С., 4, 5  
 Султанова Ш. А., 2  
 Сухоцкий А. Б., 4  
 Тиунов С. В., 2  
 Трипольская Г. С., 1, 4  
 Тытук В. К., 5  
 Фарзалиев Ю. З., 6  
 Фархадзаде Э. М., 2, 6  
 Фираго Б. И., 3  
 Фурсанов М. И., 2  
 Хаберфельнер Х., 3, 6  
 Халилов Э. Д., 1  
 Хробостов А. Е., 2  
 Цыганкова С. Д., 1  
 Черный А. П., 5  
 Чорный А. Д., 2  
 Шрёгер Р., 3, 6  
 Элзейн И., 5  
 Ярмольчик Ю. П., 3, 6