

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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 63, № 2
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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Бладыко Ю. В.** Механический расчет гибких токопроводов с сосредоточенными нагрузками 103
- Протосовицкий И. В., Забелло Е. П., Прищепов М. А., Дайнеко В. А.** Обеспечение надежности и эффективности электроэнергетики сельскохозяйственной отрасли Республики Беларусь в современных условиях 116
- Фурсанов М. И., Сазонов П. А.** Специализированные мобильные приложения как средство оптимизации системы энергоснабжения Республики Беларусь 129

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Тиунов С. В., Скрыпник А. Н., Маршалова Г. С., Гуреев В. М., Попов И. А., Кадыров Р. Г., Чорный А. Д., Жукова Ю. В.** Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик оребренных плоских труб аппарата воздушного охлаждения масла 138
- Дмитриев С. М., Герасимов А. В., Добров А. А., Доронков Д. В., Пронин А. Н., Рязанов А. В., Солнцев Д. Н., Хробостов А. Е.** Исследование локальной гидродинамики теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР 151
- Фархадзаде Э. М., Мурадалиев А. З., Рафиева Т. К., Рустамова А. А.** Достоверность линейной взаимосвязи технико-экономических показателей энергоблоков 300 МВт тепловых электростанций 163
- Сафаров Ж. Э., Султанова Ш. А., Дадаев Г. Т.** Разработка гелиоаккумуляционной сушильной установки на основе теоретических исследований аккумуляции солнечной энергии 174

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. ЖУКОВСКИЙ (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
В. В. ИВАШЕЧКИН (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
А. С. КАЛИНИЧЕНКО (Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь),
А. И. КИРИЛЛОВ (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация),
А. КОННОВ (Университет Лунда, Швеция),
Б. К. МАКСИМОВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),
Х. МАХКАМОВ (Университет Нортумбрии, Великобритания),
А. А. МИХАЛЕВИЧ (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
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),
Э. Н. САБУРОВ (Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, Архангельск, Российская Федерация),
А.-С. С. САУХАТАС (Рижский технический университет, Рига, Латвийская Республика),
В. С. СЕВЕРЯНИН (Брестский государственный технический университет, Брест, Республика Беларусь),
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 31.03.2020. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. . 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

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

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 63, No 2
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

CONTENTS

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

Bladyko Y. V. Mechanical Calculation of Flexible Wires Loaded with Concentrated Loads	103
Protosovitskii I. V., Zabello E. P., Prishchepov M. A., Daineko V. A. Ensuring the Reliability and Efficiency of the Power Industry in the Agricultural Sector of the Republic of Belarus in Modern Conditions	116
Fursanov M. I., Sazonov P. A. Specialized Mobile Applications as Means of Optimizing the Power Supply System of the Republic of Belarus	129

HEAT POWER ENGINEERING

Tiunov S. V., Skrypnik A. N., Marshalova G. S., Gureev V. M., Popov I. A., Kadyrov R. G., Chorny A. D., Zhukova Y. V. Experimental Investigation of Thermal and Hydraulic Characteristics of Finned Flat Tubes of the Oil Air Cooling Device	138
Dmitriev S. M., Gerasimov A. V., Dobrov A. A., Doronkov D. V., Pronin A. N., Ryazanov A. V., Solntsev D. N., Khrobostov A. E. Investigation of Coolant Local Hydrodynamics in the Mixed Core of the VVER Reactor	151
Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Rafiyeva T. K., Rustamova A. A. Certainty of Linear Interrelation of Technical and Economic Parameters of Power Units of 300 MWt Thermal Power Stations	163
Safarov J. E., Sultanova Sh. A., Dadayev G. T. Development of Solar Accumulating Drying Equipment Based on the Theoretical Studies of Solar Energy Accumulation	174

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),
B. K. MAKSIMOV (National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation),
K. MAHKAMOV (Northumbria University, United Kingdom),
A. A. MIKHALEVICH (The National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
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),
E. N. SABUROV (Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russian Federation),
A.-S. S. SAUHATAS (Riga Technical University, Riga, Republic of Latvia),
V. S. SEVERYANIN (Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus),
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, 28th
Reg. No 1257

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

Passed for printing 31.03.2020. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet .
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/10.21122/1029-7448-2020-63-2-103-115>

УДК 621.315.176

Механический расчет гибких токопроводов с сосредоточенными нагрузками

Ю. В. Бладыко¹⁾

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

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

Реферат. Расчет стрел провеса провода и тяжений в различных режимах – это задача механического расчета. В статье приведены формулы для кривой провисания провода при наличии одной или нескольких сосредоточенных сил и при различных натяжных гирляндах изоляторов в пролете. Получены уравнения для нахождения расстояния до максимальной стрелы провеса. Исходя из длины системы «первая натяжная гирлянда изоляторов – токопровод – вторая натяжная гирлянда изоляторов», зависящей от опорных балочных реакций и балочных поперечных сил на соответствующих участках, определяется коэффициент нагрузки системы, учитывающий конструктивные элементы для различных климатических нагрузок. Выведены формулы расчета коэффициента нагрузки для решения уравнения состояния в случае разных гирлянд в пролете при одной и нескольких сосредоточенных силах. Полученные выражения могут применяться и для горизонтальных ветровых нагрузок; тогда уравнение состояния должно учитывать эту составляющую при расчете результирующей приведенной нагрузки на провод в наклонной плоскости. 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. Построена зависимость коэффициента увеличения стрелы провеса от расстояния до сосредоточенной силы при наличии одной и двух сил в пролете.

Ключевые слова: стрела провеса, тяжение, гибкая нить, гирлянды изоляторов, уравнение состояния, пролет, эквивалентный провод, коэффициент нагрузки

Для цитирования: 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>

Mechanical Calculation of Flexible Wires Loaded with Concentrated Loads

Y. V. Bladyko¹⁾

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

Abstract. Calculating of wires sag and tension under various modes is the task of mechanical calculation. The article derived formulas for the curve of the wire sag under the action of one or several concentrated forces and with various tensioning insulators strings in the span. Formulas for

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

estimating the distance to the maximum sag have been obtained. Based on the length of the system of “first tension insulators string – conductors – second tension insulators string” that depends on the supporting beam reactions and beam lateral forces in the corresponding sections, the system load factor was determined taking into account structural elements for different climatic loads. The formulas to calculate the load factor for solving the equation of state in the case of different insulators strings in span loaded with one or several concentrated forces have been obtained. The resulting expressions can also be applied in case of horizontal wind loads; in this case the equation of state should take this component into account when calculating the resulting reduced load on the wire in an inclined plane. The reliability of the formulas was proved by the coincidence of the results for the particular case of the arrangement of the insulators strings. An algorithm for calculating sag under the combined action of vertical and horizontal loads, as well as in the case of the location of wire suspension points at different heights, is given. A formula has been proposed for estimating the sag increase factor due to the presence of concentrated forces uniformly distributed along the span and various insulator strings in the span. The dependence of the coefficient of increase of the sag on the distance to the concentrated force in the presence of one and two forces in the span is drawn.

Keywords: sag, tension, flexible string, insulator strings, equation of state, span, equivalent wire, load factor

For citation: Bladyko Y. V. (2020) Mechanical Calculation of Flexible Wires Loaded with Concentrated Loads. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (2), 103–115. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-103-115> (in Russian)

Введение

Механическому расчету гибких токопроводов распределительных устройств (РУ) и воздушных линий (ВЛ) посвящены работы [1–10]. В [1] предлагается использовать параболу для описания кривой провисания провода, там же приведены формулы для расчета стрел провеса и коэффициентов нагрузки с учетом сосредоточенных сил. Рассматривается пролет с одной или двумя одинаковыми гирляндами изоляторов в нем. В [2] показана погрешность от замены сосредоточенной нагрузки распределенной, в [3] – с учетом конструктивных элементов. В [4, 5] сосредоточенной нагрузкой являются заградительные шары, в [6] – распорки. В [7] учитываются разные гирлянды изоляторов в пролете. Тяжение провода при наличии сосредоточенной нагрузки вычислялось по уравнению состояния и совпадало с результатами расчета по программе MR2.20 [8–11]. В компьютерной программе учитывается реальное расположение в РУ до трех отпаяк к электрическим аппаратам в одном пролете. В [8] сделан вывод, что при известных значениях составляющих сосредоточенных сил можно пользоваться принятой в проектной практике моделью провода в виде параболы.

Цель исследований – определение коэффициентов для расчета стрел провеса и тяжений при сосредоточенных нагрузках и наличии в пролете разных гирлянд изоляторов.

Стрела провеса (рис. 1) в любом месте пролета может быть определена по формуле

$$y = \frac{M(x)}{H}, \quad (1)$$

где $M(x)$ – балочный изгибающий момент в точке x ; H – горизонтальная проекция тяжения в проводе.

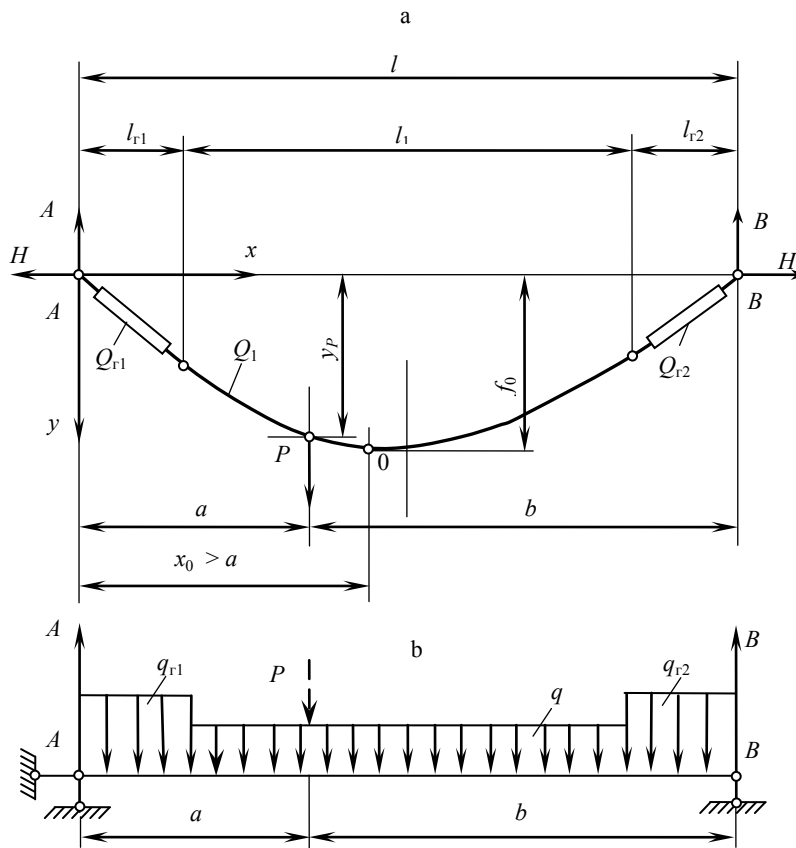


Рис. 1. Расчетная схема пролета: а – пролет с вертикальными нагрузками от провода q , гирлянд изоляторов q_{r1} , q_{r2} и с сосредоточенной силой P ; б – пролет в виде простой разрезной балки с шарнирными опорами, загруженной так же

Fig. 1. The estimated span scheme: а – span under vertical loads from the wire q , insulator strings q_{r1} , q_{r2} and under concentrated force P ; б – span in the form of a simple split beam with hinged supports, loaded in the same way

Расчет стрел провеса при наличии одной сосредоточенной силы в пролете

В [3] приведены формулы для расчета максимальных стрел провеса при одинаковых гирляндах изоляторов и симметричном расположении сосредоточенных сил вдоль пролета. В этом случае максимум провеса приходится на середину пролета.

Рассмотрим вариант, когда в пролете действует одна сосредоточенная сила. В общем случае стрелы провеса можно вычислить на основании (1). Опорные балочные реакции определяются, согласно рис. 1, по формулам:

$$A = \frac{ql}{2} + (q_{r1} - q)l_{r1} + \frac{qc - d}{2l} + \frac{Pb}{l};$$

$$B = \frac{ql}{2} + (q_{r2} - q)l_{r2} - \frac{qc - d}{2l} + \frac{Pa}{l},$$

где $c = l_{r1}^2 - l_{r2}^2$; $d = q_{r1}l_{r1}^2 - q_{r2}l_{r2}^2$; q – погонный вес провода (для расщепленных проводов – погонный вес фазы); q_{r1} , q_{r2} – то же первой и второй гирлянд изоляторов (с учетом возможного многоцепного исполнения, а также арматуры, зажимов, коромысел, ушек, скоб, серег, промежуточных звеньев и узлов крепления); l – длина пролета; l_{r1} , l_{r2} – то же первой и второй натяжных гирлянд изоляторов; P – вес сосредоточенной нагрузки; a , b – расстояние до сосредоточенной силы P от опор A и B .

Для построения зависимости стрелы провеса от координаты x определим $y(x)$ на всех участках:

$$y_1(x) = \frac{1}{H} \left[Ax - \frac{q_{r1}x^2}{2} \right] \text{ при } 0 \leq x \leq l_{r1}; \quad (2)$$

$$y_2(x) = \frac{1}{H} \left[Ax - q_{r1}l_{r1} \left(x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - \frac{q(x - l_{r1})^2}{2} \right] \text{ при } l_{r1} < x \leq a; \quad (3)$$

$$y_3(x) = \frac{1}{H} \left[Ax - q_{r1}l_{r1} \left(x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - \frac{q(x - l_{r1})^2}{2} - P(x - a) \right] \text{ при } a < x \leq (l - l_{r2}); \quad (4)$$

$$y_4(x) = \frac{1}{H} \left[Ax - q_{r1}l_{r1} \left(x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - ql_1 \left(x - l_{r1} - \frac{l_1}{2} \right) - q_{r2} \frac{(x - l + l_{r2})^2}{2} - P(x - a) \right] \text{ при } (l - l_{r2}) < x \leq l, \quad (5)$$

где $l_1 = l - l_{r1} - l_{r2}$ – длина провода без учета провисания.

По (2)–(5) строится кривая провисания провода (рис. 2а).

Максимальная стрела провеса находится решением уравнения

$$\frac{dy(x)}{dx} = 0,$$

которое дает расстояние x_0 от начала пролета до этой точки.

Для случаев расположения максимальной стрелы провеса на разных участках расстояние до нее рассчитывается по формулам:

$$x_0 = \frac{A}{q_{r1}} \text{ при } 0 \leq x_0 \leq l_{r1}; \quad (6)$$

$$x_0 = \frac{A - q_{r1}l_{r1}}{q} + l_{r1} \text{ при } l_{r1} < x_0 \leq a; \quad (7)$$

$$x_0 = \frac{A - P - q_{r1}l_{r1}}{q} + l_{r1} \text{ при } a < x_0 \leq (l - l_{r2}); \quad (8)$$

$$x_0 = \frac{A - P - ql_1 - q_{r1}l_{r1}}{q_{r2}} + l - l_{r2} \text{ при } (l - l_{r2}) < x_0 \leq l. \quad (9)$$

При невыполнении этих неравенств максимальная стрела провеса будет находиться в точке приложения сосредоточенной силы $x_0 = a$.

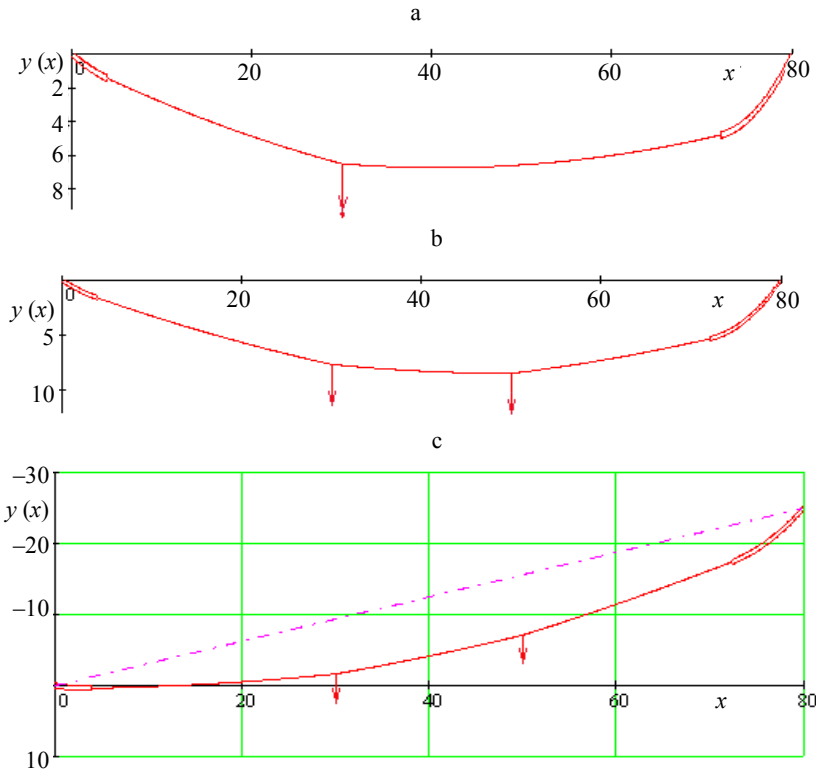


Рис. 2. Кривые провисания провода весом $q = 4$ даН/м в пролете длиной $l = 80$ м с разными гирляндами изоляторов ($l_{r1} = 4$ м, $q_{r1} = 60$ даН/м; $l_{r2} = 6$ м, $q_{r2} = 120$ даН/м):

- а – с одной сосредоточенной силой $P = 100$ даН на расстоянии $a = 30$ м;
- б – с двумя сосредоточенными силами $P_1 = P_2 = 100$ даН на расстоянии $a_1 = 30$ м, $a_2 = 50$ м;
- с – то же, в наклонном пролете с разностью высот подвеса $h = 25$ м

Fig. 2. Curves of sagging of wires of the weight $q = 4$ daN/m in a span of $l = 80$ m with different insulator strings ($l_{r1} = 4$ m, $q_{r1} = 60$ daN/m; $l_{r2} = 6$ m, $q_{r2} = 120$ daN/m):

- a – under one concentrated force $P = 100$ daN at a distance of $a = 30$ m;
- b – under two concentrated forces $P_1 = P_2 = 100$ daN at a distance of $a_1 = 30$ m, $a_2 = 50$ m;
- c – the same, in an inclined span with a height of the suspension difference $h = 25$ m

Рассмотрим случай расположения максимальной стрелы провеса на проводе (рис. 1) при $a < x_0 \leq (l - l_{r2})$ (рис. 2а). Тогда

$$f_0 = y(x_0) = \frac{1}{H} \left[\frac{(A - P)^2}{2q} - \left(A - P - \frac{q_{r1}l_{r1}}{2} \right) \left(\frac{q_{r1}}{q} - 1 \right) l_{r1} + Pa \right].$$

Коэффициент увеличения стрелы провеса, обусловленный наличием натяжных гирлянд и сосредоточенной силы, определяется по выражению $K_f = \frac{8Hf_0}{ql^2}$.

Полученные формулы (2)–(9) могут применяться и для горизонтальных ветровых нагрузок, а результирующая стрела провеса в наклонной плоскости может рассчитываться после нахождения составляющих в обеих плоскостях [3].

Расчет коэффициента нагрузки при наличии одной сосредоточенной силы в пролете

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

$$L = l + \frac{q^2 l^2 l_1 K^2}{24H^2} = l + \frac{D}{2H^2}, \quad (10)$$

где K – коэффициент нагрузки, учитывающий конструктивные элементы для различных климатических нагрузок, $K^2 = \frac{12D}{q^2 l^2 l_1}$; D – интеграл,

$$D = \int_0^l Q^2(x) dx; \quad Q(x) – \text{балочная поперечная сила.}$$

Для рис. 1 интеграл D определяется как

$$D = \int_0^{l_1} Q_1^2(x) dx + \int_{l_1}^a Q_2^2(x) dx + \int_a^{l-l_2} Q_3^2(x) dx + \int_{l-l_2}^l Q_4^2(x) dx,$$

где $Q_1(x)$, $Q_2(x)$, $Q_3(x)$, $Q_4(x)$ – балочная поперечная сила соответственно на первой гирлянде, участках провода и второй гирлянде:

$$Q_1(x) = A - q_{r1}x;$$

$$Q_2(x) = A - q_{r1}l_{r1} - q(x - l_{r1});$$

$$Q_3(x) = A - P - q_{r1}l_{r1} - q(x - l_{r1});$$

$$Q_4(x) = A - P - q_{r1}l_{r1} - ql_1 - q_{r2}(x - l + l_{r2}).$$

Коэффициент нагрузки при одинаковых гирляндах ($q_{r1} = q_{r2} = q_r$; $l_{r1} = l_{r2} = l_r$) совпадает с формулой [1]

$$K^2 = \frac{l_1(l + 4l_r)}{l^2} + \frac{12}{q^2 l^2 l_1} \left[q_r l_r^2 \left(ql_1 + \frac{2q_r l_r}{3} + P \right) + Pq(ab - l_r^2) + \frac{P^2 ab}{l} \right].$$

Полученные выражения могут применяться и для горизонтальных ветровых нагрузок. Тогда уравнение состояния должно учитывать эту составляющую при расчете результирующей приведенной нагрузки на провод в наклонной плоскости [3].

Расчет стрел провеса

при наличии нескольких сосредоточенных сил в пролете

Пусть в пролете действуют n сосредоточенных сил. Тогда опорные балочные реакции определяются по формулам:

$$A = \frac{ql}{2} + (q_{r1} - q)l_{r1} + \frac{qc - d}{2l} + \frac{\sum_{i=1}^n P_i b_i}{l};$$

$$B = \frac{ql}{2} + (q_{r2} - q)l_{r2} - \frac{qc - d}{2l} + \frac{\sum_{i=1}^n P_i a_i}{l},$$

где P_i – вес i -й сосредоточенной нагрузки; a_i, b_i – расстояние до i -й сосредоточенной силы P_i от опор A и B .

Для построения зависимости стрелы провеса от координаты x определим $y(x)$ на всех участках:

$$y_1(x) = \frac{1}{H} \left[Ax - \frac{q_{r1}x^2}{2} \right] \text{ при } 0 \leq x \leq l_{r1};$$

$$y_2(x) = \frac{1}{H} \left[Ax - q_{r1}l_{r1} \left(x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - \frac{q(x - l_{r1})^2}{2} \right] \text{ при } l_{r1} < x \leq a_1;$$

$$y_3(x) = \frac{1}{H} \left[Ax - q_{r1}l_{r1} \left(x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - \frac{q(x - l_{r1})^2}{2} - P_1(x - a_1) \right] \text{ при } a_1 < x \leq a_2;$$

$$\dots$$

$$y_{k+2}(x) = \frac{1}{H} \left[Ax - q_{r1}l_{r1} \left(x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - \frac{q(x - l_{r1})^2}{2} - \sum_{i=1}^k P_i(x - a_i) \right]$$

$$\text{при } a_k < x \leq a_{k+1} \ (k = 2 \dots n-1);$$

$$\dots$$

$$y_{n+2}(x) = \frac{1}{H} \left[Ax - q_{r1}l_{r1} \left(x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - \frac{q(x - l_{r1})^2}{2} - \sum_{i=1}^n P_i(x - a_i) \right]$$

$$\text{при } a_n < x \leq (l - l_{r2});$$

$$y_{n+3}(x) = \frac{1}{H} \left[Ax - q_{r1} l_{r1} \left(x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - q l_1 \left(x - l_{r1} - \frac{l_1}{2} \right) - q_{r2} \frac{(x - l + l_{r2})^2}{2} - \sum_{i=1}^n P_i (x - a_i) \right] \\ \text{при } (l - l_{r2}) < x \leq l.$$

Для случаев расположения максимальной стрелы провеса на разных участках расстояние до нее рассчитывается по формулам:

$$x_0 = \frac{A}{q_{r1}} \text{ при } 0 \leq x_0 \leq l_{r1};$$

$$x_0 = \frac{A - q_{r1} l_{r1}}{q} + l_{r1} \text{ при } l_{r1} < x_0 \leq a;$$

$$x_0 = \frac{A - P_1 - q_{r1} l_{r1}}{q} + l_{r1} \text{ при } a_1 < x_0 \leq a_2;$$

$$\dots$$

$$x_0 = \frac{A - \sum_{i=1}^k P_i - q_{r1} l_{r1}}{q} + l_{r1} \text{ при } a_k < x_0 \leq a_{k+1} \text{ (} k = 2 \dots n-1 \text{);}$$

$$\dots$$

$$x_0 = \frac{A - \sum_{i=1}^n P_i - q_{r1} l_{r1}}{q} + l_{r1} \text{ при } a_n < x_0 \leq (l - l_{r2});$$

$$x_0 = \frac{A - \sum_{i=1}^n P_i - q l_1 - q_{r1} l_{r1}}{q_{r2}} + l - l_{r2} \text{ при } (l - l_{r2}) < x_0 \leq l.$$

Если эти неравенства не выполняются, то максимальная стрела провеса будет находиться в точке приложения одной из сосредоточенных сил $x_0 = a_i$, дающей $f_0 = \max[y(a_i)]$. На рис. 2b $x_0 = a_2$.

Расчет коэффициента нагрузки при наличии нескольких сосредоточенных сил в пролете

Интеграл D для формулы (10) определяется как

$$D = \int_0^{l_{r1}} Q_1^2(x) dx + \int_{l_{r1}}^{a_1} Q_2^2(x) dx + \int_{a_1}^{a_2} Q_3^2(x) dx + \dots + \int_{a_k}^{a_{k+1}} Q_{k+2}^2(x) dx + \dots + \\ + \int_{a_n}^{l-l_{r2}} Q_{n+2}^2(x) dx + \int_{l-l_{r2}}^l Q_{n+3}^2(x) dx \text{ (} k = 2 \dots n-1 \text{),}$$

где $Q_1(x)$ – $Q_{n+3}(x)$ – балочная поперечная сила соответственно на первой гирлянде, участках провода и второй гирлянде,

$$\begin{aligned}
Q_1(x) &= A - q_{r1}x; \\
Q_2(x) &= A - q_{r1}l_{r1} - q(x - l_{r1}); \\
Q_3(x) &= A - P_1 - q_{r1}l_{r1} - q(x - l_{r1}); \\
&\dots \\
Q_{k+2}(x) &= A - \sum_{i=1}^k P_i - q_{r1}l_{r1} - q(x - l_{r1}); \\
&\dots \\
Q_{n+2}(x) &= A - \sum_{i=1}^n P_i - q_{r1}l_{r1} - q(x - l_{r1}); \\
Q_{n+3}(x) &= A - \sum_{i=1}^n P_i - q_{r1}l_{r1} - ql_1 - q_{r2}(x - l + l_{r2}).
\end{aligned}$$

Совместное действие вертикальных и горизонтальных нагрузок

Появление горизонтальных нагрузок связано с действием ветра и реальным расположением отпаяк к электрическим аппаратам. Расчет горизонтальных отклонений ведется независимо от расчета стрел провеса, в формулы (2)–(9) подставляются нагрузки, действующие в горизонтальной плоскости [3]. Необходимо учитывать возрастание нагрузок от действия ветра при покрытии гололедом проводов, отпаяк, гирлянд изоляторов, распорок и заградительных шаров [5]. Коэффициенты нагрузки также определяются в двух плоскостях, но в выражение (10) подставляется результирующий коэффициент [3].

Расположение точек подвеса провода на разных высотах

Всеми вышеприведенными выражениями можно пользоваться после замены в формулах длин гирлянд изоляторов l_{r1} и l_{r2} на $l_{r1}\cos\theta$ и $l_{r2}\cos\theta$, погонных нагрузок q – на $q/\cos\theta$, q_{r1} – на $q_{r1}/\cos\theta$ и q_{r2} – на $q_{r2}/\cos\theta$, где θ – угол наклона пролета, $\tan\theta = h/l$; h – разность высот подвеса проводов.

Учет разности высот подвеса приводит к корректировке выражений (2)–(5) для определения провеса провода $y(x) - \frac{xh}{l}$.

Максимальные стрелы провеса и расстояния до них определяются по (6)–(9) относительно линии, соединяющей точки подвеса (рис. 2с). Нахождение их относительно горизонтальной оси приводит к корректировке $x_0 - \frac{Hh}{ql}$.

Оценка коэффициента увеличения стрелы провеса

В [3] получено выражение для определения коэффициента увеличения стрелы провеса. После учета разных гирлянд изоляторов в пролете, как в [7], его можно записать следующим образом:

$$K_f = \frac{1 + 2\delta_1 + 2\delta_2 + (\delta_1 - \delta_2)^2 + K_p(1 + 1/n)}{\cos \theta}, \quad (11)$$

где $\delta_1 = (K_{B1} - 1)K_{r1}^2$; $\delta_2 = (K_{B2} - 1)K_{r2}^2$ – коэффициент, учитывающий наличие первой и второй натяжных гирлянд изоляторов; $K_{B1} = \frac{q_{r1}}{q}$, $K_{B2} = \frac{q_{r2}}{q}$ – кратность веса первой и второй натяжных гирлянд изоляторов относительно веса 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; $K_p = \frac{P \cos \theta}{ql}$ – коэффициент сосредоточенных сил; $P = \sum_{i=1}^n P_i$ – суммарный вес n сосредоточенных нагрузок.

Выражение (11) было получено для симметричного расположения сосредоточенных сил, равномерно распределенных вдоль пролета [3]. Оно дает хороший результат при отсутствии сосредоточенной нагрузки при разных гирляндах изоляторов в пролете [7], в общем же случае может служить оценкой максимальной стрелы провеса. Рассмотрим это на примерах рис. 3, 4.

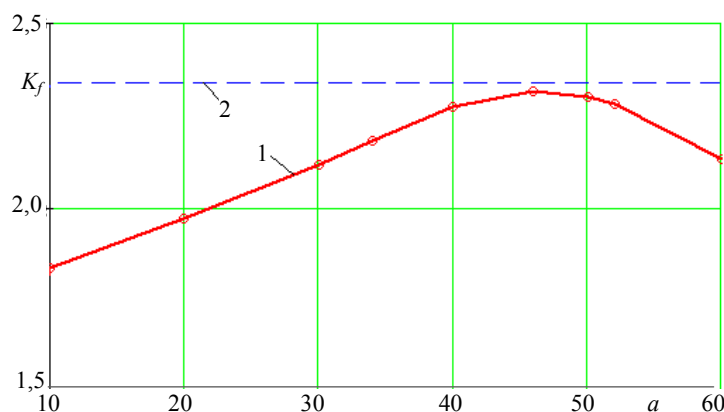


Рис. 3. Зависимость коэффициента увеличения стрелы провеса от расстояния до сосредоточенной силы для данных рис. 2а: 1 – зависимость $K_f(a)$; 2 – расчет по (11) для $n = 1$

Fig. 3. The dependence of the sag increase factor on the distance to the concentrated force for the data of Fig. 2а: 1 – dependence $K_f(a)$; 2 – calculation by (11) for $n = 1$

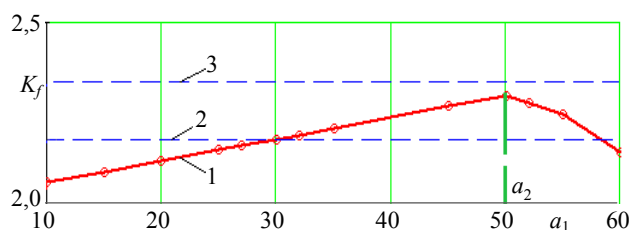


Рис. 4. Зависимость коэффициента увеличения стрелы провеса от расстояния до первой сосредоточенной силы a_1 для данных рис. 2 с двумя сосредоточенными силами $P_1 = P_2 = 50$ даН на расстоянии $a_2 = 50$ м: 1 – зависимость $K_f(a_1)$; 2, 3 – расчет по (11) для $n = 2$ и $n = 1$ соответственно

Fig. 4. The dependence of the sag increase factor on the distance to the first concentrated force a_1 for data of Fig. 2 under two concentrated forces $P_1 = P_2 = 50$ daN at a distance of $a_2 = 50$ m: 1 – dependence $K_f(a_1)$; 2, 3 – calculation by (11) for $n = 2$ and for $n = 1$

Как видно из рис. 3, коэффициент увеличения стрелы провеса зависит от расстояния до сосредоточенной силы, а формула (11) является асимптотой зависимости $K_f(a)$. Рис. 4 показывает, что при равномерной расстановке сосредоточенных сил вдоль пролета оценить увеличение стрелы провеса можно по (11). В случае совпадения точек приложения сил $a_1 = a_2$ кривая $K_f(a_1)$ приближается к асимптоте при $n = 1$.

ВЫВОДЫ

1. Выведены формулы (2)–(5) для построения кривой провисания провода при наличии одной сосредоточенной силы в любой точке пролета и при различных натяжных гирляндах изоляторов в пролете. Получены уравнения (6)–(9) для нахождения расстояния до максимальной стрелы провеса. Те же выражения можно использовать для любого числа сосредоточенных сил.

2. Приведены выражения 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.

3. Представлен алгоритм расчета стрел провеса при совместном действии вертикальных и горизонтальных нагрузок, а также в случае расположения точек подвеса провода на разных высотах.

4. Предложена формула для оценки коэффициента увеличения стрелы провеса, обусловленного наличием сосредоточенных сил, равномерно распределенных вдоль пролета, и разных гирлянд изоляторов в пролете.

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. за-

- ведений 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. заведений 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. Стрелюк, М. И. Численный метод расчета статики гибкой ошиновки ОРУ в различных режимах климатических воздействий / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений. 1983. № 8. С. 8–14.
 9. 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. № 3–19. 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. 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.

Поступила 08.02.2019 Подписана в печать 30.05.2019 Опубликовано онлайн 31.03.2020

REFERENCES

1. Boshnyakov A. D. (1975) *Calculation of the Wires of Substations and Large Transitions of Transmission Lines*. Leningrad, Energia 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 Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (2), 97–107 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-97-107>.
3. Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires when the Concentrated Loads are Replaced by Distributed Ones Taking into Account the Structural Elements. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 220–234 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-220-234>.

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 Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 299–309 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-299-309>.
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 Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 24–36 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-24-36>.
6. Bladyko Y. V. (2019) Accounting for Spacers in the Mechanical Calculation of Flexible Wires for Overhead Lines and Substations. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (3), 219–231 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-219-231>.
7. Bladyko Y. V. (2020) Mechanical Calculation of Flexible Wires of Spans with Different Tension Insulator Strings. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (1), 55–65 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-55-65>.
8. Strelyuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Y. V. (1983) Numerical Method for Calculating the Statics of a Flexible Busbars of Open Distribution Devices in Various Modes of Climatic Influences. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions*, (8), 8–14 (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. *Mathematical Methods in the Electric Power Industry: Materials of the II International Symposium. Polish Academy of Sciences. Zakopane, 10–12 Nov. 1988. Zakopane* (3–19), 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 Education Institutions*, (3–4), 21–29 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-116-128>

УДК 631.371:620.9

Обеспечение надежности и эффективности электроэнергетики сельскохозяйственной отрасли Республики Беларусь в современных условиях

И. В. Протосовицкий¹⁾, Е. П. Забелло¹⁾, М. А. Прищепов¹⁾, В. А. Дайнеко¹⁾

¹⁾Белорусский государственный аграрный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

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

Реферат. Обоснована необходимость совершенствования системы электроснабжения в сельскохозяйственной отрасли в связи с ростом доли нагрузок первой категории, требующих обеспечения адресной надежности. Совершенствование технико-экономических показателей централизованной генерации энергии, ее передачи по магистральным и распределительным сетям не может обеспечить высокую надежность потребителей первой категории, число которых в сельском хозяйстве постоянно растет. Отмечено, что если в энергосистеме при аварийном отключении генерирующего источника высокой мощности обеспечивается питание путем ввода аварийного резерва, то при аварийном отключении участка питающей сети электропитание может отсутствовать длительное время (до нескольких часов) у потребителей, запитанных по схемам как радиальной, так и закольцованной распределительной сети. Рассмотрены пути и способы совершенствования системы электроснабжения, такие как интеграция единой энергосистемы с источниками распределенной генерации, обеспечение их параллельной работы, управление нагрузками с применением сложных тарифов на электрическую энергию, учитывающих форму графиков нагрузки, модернизация технологических процессов с учетом их автоматизации и повышения технико-экономических показателей. Принимая во внимание увеличение объемов электропотребления для нужд отопления и горячего водоснабжения, рассмотрен вариант ликвидации перекрестного субсидирования, при котором повышается интерес потребителей к экономии электроэнергии и снижению платы за электропотребление путем изменения режимов работы оборудования и приборов. Анализ перспективных мероприятий по энергосбережению в агроэнергетике показал, что к режимным мероприятиям добавляются другие, обусловленные тем, что за последние десятилетия в энергетике сельского хозяйства существенно продвинулись в своем развитии силовая электроника и микропроцессорная техника, например для частотного управления асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором с высокими энергетическими и динамическими показателями. Поскольку в сельском хозяйстве существует ряд технологий, где электрическая энергия используется без применения установок электропривода и в каждом из технологических процессов имеются свои требования к надежности и качеству электрической энергии, рассмотрена схема взаимного резервиро-

Адрес для переписки

Забелло Евгений Петрович
Белорусский государственный аграрный
технический университет
просп. Независимости, 99
220023, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 377-63-42
kafeshp@tut.by

Address for correspondence

Zabello Evgenii P.
Belarusian State Agrarian
Technical University
99, Nezavisimosty Ave.,
220023, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 377-63-42
kafeshp@tut.by

вания от смежных подстанций с использованием источников распределенной генерации и технических средств автоматизированного энергоучета, контроля и управления электрическими нагрузками.

Ключевые слова: агроэнергетика, распределенная генерация, многоуровневый энергоучет, сложные тарифные системы, режимы работы, энергоэффективность

Для цитирования: Обеспечение надежности и эффективности электроэнергетики сельскохозяйственной отрасли Республики Беларусь в современных условиях / И. В. Протосовицкий [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 2. С. 116–128. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-116-128>

Ensuring the Reliability and Efficiency of the Power Industry in the Agricultural Sector of the Republic of Belarus in Modern Conditions

I. V. Protosovitskii¹⁾, E. P. Zabello¹⁾, M. A. Prishchepov¹⁾, V. A. Daineko¹⁾

¹⁾Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The necessity of improving the power supply system in the agricultural sector is substantiated by the growing share of first-category loads that require targeted reliability. Improving values of the technical and economic indicators of centralized energy generation and its transmission through main and distribution grids cannot ensure high reliability of consumers of the first category, the number of which is constantly growing in agriculture. It is noted that if the power system in outage of the generating source of the high power supply is provided by inputting the emergency reserve, then at emergency switching-off phase of the section of the mains, power supply of the consumers powered by the schemes for both radial and looped distribution network may be absent for a long period of time (several hours). The ways and methods of improving the power supply system, such as integration of a single power system with distributed generation sources, ensuring their parallel operation, load management using complex tariffs for electric energy that take into account the form of load schedules, modernization of technological processes taking into account their automation and improvement of technical and economic indicators, are considered. Taking into account the increase in electricity consumption for heating and hot water supply, we consider the option of eliminating cross-subsidization, which stimulates the interest of consumers in saving electricity and reducing the fee for electricity consumption by changing the operating modes of equipment and devices. The analysis of promising energy-saving measures in agricultural power engineering demonstrated that routine measures are being supplemented by other measures induced by the fact that power electronics and microprocessor technology have significantly advanced in their development in the agricultural energy sector over the past decades, for example, for frequency control of asynchronous motors equipped by a short-circuited rotor that has high values of energy and dynamic indicators. Since there are a number of technologies in agriculture where electric energy is used without the electric drive units application and each of the technological processes has its own requirements for the reliability and quality of electric energy, the scheme of mutual redundancy from adjacent substations using distributed generation sources and technical means of automated energy accounting, control and management of electrical loads, is considered.

Keywords: agricultural power engineering, distributed generation, multi-level energy accounting, complex tariff systems, operating modes, energy efficiency

For citation: Protosovitskii I. V., Zabello E. P., Prishchepov M. A., Daineko V. A. (2020) Ensuring the Reliability and Efficiency of the Power Industry in the Agricultural Sector of the Republic of Belarus in Modern Conditions. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (2), 116–128. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-116-128> (in Russian)

Введение

Динамика роста электрических нагрузок в сельскохозяйственной отрасли и увеличение доли нагрузок первой категории потребовали совершенствования подходов при создании всей цепи электроснабжения – от генерации, передачи и распределения энергии до ее потребления. На первом уровне все большую долю стали занимать источники распределенной генерации (РГ) – ветряные и солнечные электростанции, накопители энергии, биогазовые установки, как правило, малой и средней мощности, что потребовало проведения специальных исследований по обеспечению интеграции источников РГ в энергосистему. На этапе распределения энергии появилась необходимость реконструкции электрических сетей напряжением 10 кВ с учетом их кольцевания, секционирования и совершенствования релейных защит и в целом автоматизации сетей с точки зрения включения на параллельную работу с энергосистемой источников РГ. В области потребления энергии совершенствование связано с ростом разнообразия видов потребителей, их единичной и суммарной мощности, степени автоматизации и регулировочных возможностей в условиях переменных электрических нагрузок. Решение перечисленных задач должно быть комплексным, хотя оно касается различных государственных и частных поставщиков и потребителей, цели которых не совпадают, и исключается возможность разработки целевых функций, сводимых в единую систему для принятия оптимальных решений.

Централизованная генерация энергии

Учитывая предстоящий ввод в эксплуатацию двух блоков Белорусской АЭС, существенный рост суммарной электрической мощности энергоисточников в энергосистеме требует более широкого использования электрической энергии во всех технологических процессах, в том числе и в сельском хозяйстве, а также частичной замены вида энергии в ряде процессов, основываясь на динамике изменения удельных расходов топлива на выработку и передачу электрической и тепловой энергии. Динамика обосновывается совершенствованием как источников электрической и тепловой энергии, так и сокращением расходов на ее транспорт и применение.

Динамика изменения удельных расходов условного топлива на производство электрической ($b_{уд}$, кг/(кВт·ч)) и тепловой ($d_{уд}$, кг/Гкал) энергии в Минэнерго за 2012–2017 гг., по данным [1], приведена в табл. 1.

Как следует из приведенных в табл. 1 показателей, имеет место существенное снижение значений $b_{уд}$ (на 9,7 %) и незначительное $d_{уд}$ (на 0,7 %) на временном отрезке в шесть лет. Подобная динамика свидетельствует о том, что темп снижения удельных расходов на производство электроэнергии более чем в 10 раз выше темпа снижения удельных расходов топлива на производство тепловой энергии; в связи с чем применение электрической энергии взамен тепловой в процессах ее потребления становится более выгодным. Добавим к этому еще и то, что на рассматриваемом от-

резке времени технологический расход энергии на ее транспорт в электрических сетях уменьшился с 9,91 до 8,85 %, т. е. на 11,90 %, а в тепловых сетях – с 9,55 до 9,21 % (только на 3,70 %) [1].

Таблица 1

**Динамика удельных расходов условного топлива
на производство электрической и тепловой энергии и их соотношение**

**Movement of the specific consumption of conventional fuel
for the production of electric and thermal energy and their ratio**

Год	$b_{уд}$, кг/(кВт·ч)	$d_{уд}$, кг/Гкал	$\frac{b_{уд}}{d_{уд}}$, кВт·ч/Гкал
2012	0,2546	167,82	654,52
2013	0,2561	167,57	654,31
2014	0,2468	167,55	678,90
2015	0,2355	167,52	710,10
2016	0,2304	167,06	725,09
2017	0,2321	166,63	717,92

Однако совершенствование технико-экономических показателей централизованной генерации энергии, ее передачи по магистральным и распределительным сетям не может обеспечить высокую надежность потребителей первой категории, число которых в сельском хозяйстве постоянно растет. Если в энергосистеме при аварийном отключении генерирующего источника высокой мощности обеспечивается питание путем ввода аварийного резерва, то при аварийном отключении участка питающей сети электропитание может отсутствовать длительное время (до нескольких часов) у потребителей, запитанных по схемам как радиальной, так и замкнутой распределительной сети. Подобная ситуация имеет место во всех странах – даже с высокой технологией производства и потребления энергии. Поэтому современная энергетика развивается в так называемом формате 4Д [2]:

- Д1 – декарбонизация – ускоренное снижение зависимости от углеродородных топлив, использование местных ресурсов, отходов и возобновляемых источников энергии (ВИЭ);
- Д2 – децентрализация – внедрение распределенных систем энергоснабжения на базе электростанций малой мощности по технологиям когенерации и тригенерации, с использованием местных топлив и ВИЭ;
- Д3 – диверсификация – многообразие энергетических схем, видов используемых топлив, инвестиционных бизнес-моделей, инструментов взаимодействия производителей энергии и бытовых структур;
- Д4 – дигитализация, Интернет вещей, цифровые технологии в энергетике.

Перечисленные составляющие формата 4Д частично учтены при разработке ТКП 609–2017 «Автоматизация распределительных электрических сетей напряжением 0,4–10 кВ», устанавливающего общие требования

к компонентам комплекса автоматизированной системы управления распределительными электрическими сетями напряжением 0,4–10 кВ. Так, в п. 5.3 документа указано, что к первостепенным задачам автоматизации распределительных электрических сетей относятся следующие:

- увеличение оперативности переключений в сетях путем установки новых или замены физически изношенных и морально устаревших коммутационных аппаратов в ТП, РП, КТП, установки реклоузеров и (или) управляемых выключателей нагрузки, разъединителей на линиях электропередачи;
- автоматическое управление переключениями при аварийном отключении элементов электрической сети 10 кВ;
- обеспечение расширенных функций мониторинга и диагностики текущего состояния применяемого электрооборудования;
- изменение схем построения распределительной электрической сети при ее реконструкции и автоматизации;
- оптимизация режима работы электрической сети за счет наличия в ней дистанционно управляемых элементов с использованием динамической модели сети и телеметрической информации с объектов автоматизации;
- повышение пропускной способности распределительных электрических сетей и снижение потерь электроэнергии [3, 4];
- создание сетевой технологической структуры, способствующей эффективности функционирования рынка энергии.

Электроснабжение потребителей аграрного сектора

Электроснабжение потребителей аграрного сектора в настоящее время осуществляется в основном по распределительным сетям напряжением 10 и 0,4 кВ. Централизованное электроснабжение с наличием генерирующих источников большой единичной мощности (300, 400, 1200 мВт) и линий электропередачи напряжением 750, 330 кВ и менее, как уже отмечалось, хотя и гарантирует высокие значения показателей надежности в целом по зонам электроснабжения, однако обеспечение адресной надежности при подобном способе электроснабжения исключено. По этой причине в Республике Беларусь уже действуют более 400 блок-станций на различных предприятиях, в системе ЖКХ, у частных инвесторов, в том числе и на балансе ГПО «Белэнерго». Дальнейшее усиление децентрализации электроснабжения в настоящее время практически заморожено в связи с подготовкой к вводу АЭС. Это нерациональный подход, поскольку проблема состоит не только в поиске новых потребителей энергии, но и в покрытии переменных нагрузок на различных интервалах – суточных, недельных и сезонных, так как плотность графиков нагрузок и коэффициент их неравномерности в динамике за последние 15 лет практически не изменились [5]. Заметим, что при неровных графиках нагрузок имеет место снижение надежности электроснабжения, поскольку увеличивается число

пусков-остановов как основного генерирующего оборудования, так и резервных источников и источников РГ.

Проблема выравнивания электрических нагрузок может быть успешно решена при наличии возможности их переноса из пиковых в непиковые зоны, глубокой автоматизации производства (непрерывные технологические процессы) и применении источников генерации в виде накопителей энергии. Следует отметить, что в республике проведение подобных мероприятий не имеет системного характера, а в сельском хозяйстве особо не практикуется, так как полагается, что при невысокой доле электропотребления в отрасли по отношению к суммарному по всем отраслям ожидаемые результаты будут незначительными. Это привело к тому, что электрическая энергия поставляется потребителям сельхозсектора в основном по одноставочному тарифу, и по этой причине современные технические средства энергоучета, контроля и управления нагрузками оказываются невостребованными, что приводит не к получению экономического эффекта от выполнения названных процедур, а к нанесению дополнительного ущерба, поскольку современные многофункциональные технические средства автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии дорогостоящи, как и вся электроника вообще. Однако в последнее время совершенствованию тарифов на электрическую энергию, в том числе и в коммунально-бытовом секторе, стало уделяться больше внимания, о чем свидетельствует постановление Совета Министров Республики Беларусь [6], согласно которому введена трехзонная дифференциация тарифов на электрическую энергию, потребляемую населением для бытовых целей. Выполним сравнительный анализ платы за электропотребление некоторым бытовым потребителем при использовании трехзонного тарифа и действующего одноставочного (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение платы за электропотребление по трехзонному и одноставочному тарифам с суточным графиком нагрузок, приведенным на рис. 1 (кривая 1), и по ровному графику

Comparison of electricity charges for three-zone and one-rate tariffs with the daily load schedule as shown on Fig. 1 (curve 1) and for an even schedule

Вид тарифа	Тариф, руб./(кВт·ч)			Объем электропотребления, кВт·ч/сут			Суммарная плата за сутки $P_{сут}$, руб.
	Ночной T_n	Полупиковый $T_{пп}$	Пиковый T_p	W_n	$W_{пп}$	W_p	
Трехзонный	0,0890	0,1039	0,2671	60,0	148,50	102,0	48,01
Одноставочный	0,1484	0,1484	0,1484	60,0	148,50	102,0	46,08
Трехзонный при работе по ровному графику нагрузок	0,0890	0,1039	0,2671	90,5	142,23	77,6	43,55

В табл. 2 приведены исходные данные по тарифам ночной (с 23:00 до 6:00), полупиковой (с 6:00 до 17:00), пиковой зон (с 17:00 до 23:00) и одноставочному тарифу. Объемы электропотребления рассчитаны по зо-

нам в двух вариантах: в соответствии с приведенным на рис. 1 реальным графиком нагрузок (ГН) для многоквартирного дома и ровным графиком при том же объеме электропотребления. Расчет суммарной платы за суточный объем электропотребления $\Pi_{\text{сут}}$ выполнен по следующим формулам:

– по трехзонному тарифу

$$\Pi_{\text{сут.т}} = T_{\text{н}} W_{\text{н}} + T_{\text{пп}} W_{\text{пп}} + T_{\text{п}} W_{\text{п}}; \quad (1)$$

– по одноставочному тарифу

$$\Pi_{\text{сут.о}} = T_{\text{о}} (W_{\text{н}} + W_{\text{пп}} + W_{\text{п}}); \quad (2)$$

– по трехзонному тарифу при ровном графике нагрузок (ГН)

$$\Pi_{\text{сут.тр}} = T_{\text{н}} W_{\text{нр}} + T_{\text{пп}} W_{\text{ппр}} + T_{\text{п}} W_{\text{ппр}}. \quad (3)$$

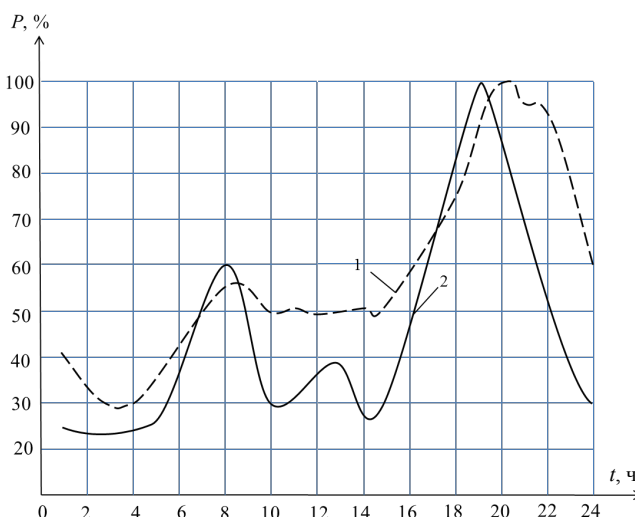


Рис. 1. Суточные графики нагрузок жилого многоквартирного (1) и сельского жилого (2) домов в зимний период

Fig. 1. The daily schedules of loads of residential multi-apartment (1) and rural residential (2) houses during the winter period

В (3) значения W рассчитаны исходя из того, что средняя нагрузка $\bar{P}$ при ровном ГН определена по формуле

$$\bar{P} = \frac{W_{\text{н}} + W_{\text{пп}} + W_{\text{п}}}{24}. \quad (4)$$

В связи с чем:

$$W_{\text{нр}} = \bar{P} t_{\text{н}}; \quad W_{\text{ппр}} = \bar{P} t_{\text{пп}}; \quad W_{\text{п}} = \bar{P} t_{\text{п}}, \quad (5)$$

где $t_{\text{н}}$, $t_{\text{пп}}$, $t_{\text{п}}$ – длительность зон (соответственно 7, 11 и 6 ч).

Согласно данным последней колонки табл. 2, наименьшее значение платы за электрическую энергию приходится при электропотреблении по ровному ГН, а разница платы по одноставочному и трехзонному тарифам несущественна – 4,2 %. То есть использование предложенного варианта тарифа на электроэнергию в коммунально-бытовом секторе в подобном виде и принятых соотношений ставок по зонам является недостаточно эффективным стимулом для переноса электрических нагрузок потребителями данного сектора из зон пиковых нагрузок в зоны полупиковых и ночных нагрузок.

Суточные графики электрических нагрузок в современных жилых домах

Для сравнения суточных графиков нагрузок современного жилого и сельского домов (данные за 2000 г. [7]) на рис. 1 приведены кривые, свидетельствующие о том, что в обоих случаях ГН различаются несущественно в период пиковых нагрузок энергосистемы (с 18:00 до 22:00) и ночные часы (с 23:00 до 7:00), причем коэффициент неравномерности, определяемый отношением минимальной и максимальной нагрузок, равен 0,29. Учитывая, что формирование ГН в коммунально-бытовом секторе как в городах, так и в сельской местности обусловлено в основном биологическими циклами и сменностью работы, без источников распределенной генерации проблема выравнивания графиков, подобных приведенным на рис. 1, практически неразрешима. Данное обстоятельство усугубляется еще и тем, что в республике проводятся экспериментальные исследования по вводу в эксплуатацию жилых домов, в которых для нужд отопления, горячего водоснабжения, приготовления пищи используется только электроэнергия в дополнение к уже традиционным видам ее применения. Так, в [8] представлены информация по восьмиквартирному дому (табл. 3) и результаты расчетов объемов электропотребления W_{Σ} за январь – март и удельного значения $W_{\Sigma\text{уд}}$ на одну квартиру, плата за электропотребление по одноставочному и трехзонному тарифам при допущении, что суточный график нагрузок соответствует приведенному на рис. 1 для многоквартирного жилого дома. Расчет показал, что для обоих вариантов тарифов месячная плата за электропотребление составляет более 100 руб., если не использовать льготный тариф на электроэнергию, как это делается при централизованном теплоснабжении в настоящее время.

Таблица 3

Объемы электропотребления в полностью электрифицированном жилом доме и плата по двум видам тарифов

The volumes of power consumption in the fully electrified residential building and the payment for two types of tariffs

Месяц	W_{Σ} , кВт·ч	$W_{\text{уд}}$, кВт·ч/квартиру	Плата по тарифу, руб./мес.	
			одноставочному	трехзонному
Январь	7140	759,3	112,7	117,2
Февраль	6347	707,6	105,0	109,2
Март	6178	694,8	103,1	107,2

В связи с этим проведем дополнительные расчеты, используя соотношение удельных расходов топлива на производство электро- и теплоэнергии (табл. 1), тарифы на оба вида энергии (T_e и T_t) и допущение, что до перевода дома полностью на электропотребление его удельная величина в расчете на квартиру составляла $W' = 100$ кВт·ч/мес. Учитывая это и приведенные в табл. 1 значения соотношений удельных расходов условного топлива на производство электрической и тепловой энергии в пределах $K_{уд} = 650\text{--}700$ кВт·ч/Гкал (примем в среднем $K_{уд} = 675$ кВт·ч/Гкал), получим следующую формулу для расчета платы за теплопотребление по действующей системе в соответствии с тарифом на тепловую энергию для нужд отопления и горячего водоснабжения ($T_t = 18,48$ руб./Гкал с июня по декабрь):

$$\Pi = \frac{W_{уд} - W'}{K_{уд}} T_t = \frac{\Delta W T_t}{K_{уд}}, \quad (6)$$

где ΔW – дополнительный объем электропотребления.

Согласно (6), плата составит величины, приведенные в табл. 4. Видно, что в случае применения только электрической энергии эта сумма увеличивается в 5,4 раза в связи с тем, что плата за тепловую энергию в настоящее время в коммунально-бытовом секторе существенно дотируется.

Таблица 4

Плата за дополнительный объем электропотребления и ее соотношение с оплатой по действующему тарифу на отпуск тепловой энергии для нужд отопления и горячего водоснабжения

The fee for additional power consumption and its ratio with the payment at the current tariff for the release of heating and hot water supply

Месяц	ΔW , кВт·ч/квартиру	Плата Π_e за ΔW , руб./квартиру	Плата Π_t по тарифу на тепловую энергию T_t , руб./квартиру	$\frac{\Pi_e}{\Pi_t}$
Январь	659,3	97,80	18,05	5,41
Февраль	607,6	90,17	16,63	5,42
Март	594,8	88,30	16,28	5,42

Результаты расчетов, приведенные в табл. 4, свидетельствуют о том, что переход на электрификацию жилых домов в полном объеме требует ликвидации перекрестного субсидирования, по крайней мере в данном случае, хотя уже неоднократно отмечалось и в печати, и в ряде документов Минэнерго, что эта мера назрела давно во всех отраслях энергетики и ее реализацию нужно ускорять повсеместно. О возможностях и сложности подобной работы говорилось в [9], где рассмотрены экономические стимулы совершенствования систем энергообеспечения и энергопотребления в коммунально-бытовом секторе.

В отличие от варианта повышения платы за электропотребление в условиях роста его объема, рассмотренного в данной статье, в [9] полага-

лось, что он, наоборот, будет снижаться за счет регулировочных и энерго-сберегающих мероприятий путем стимулирования потребителя. Подобное стимулирование (повышение зарплаты и снижение налоговой ставки) тем более рационально при существенном росте электрических нагрузок. В противном случае широкого применения метод полной электрификации жилых домов, рассмотренный в [8], не получит. Правда, временное решение затронутой проблемы найдено в [6], так как согласно п. 4 раздела «Тарифы на электроэнергию для населения» записано: «Электрическая энергия для нужд отопления и горячего водоснабжения в жилых домах (квартирах), не оборудованных в установленном порядке системами централизованного тепло- и газоснабжения, при наличии отдельного (дополнительного) прибора индивидуального учета электрической энергии для нужд отопления и горячего водоснабжения оплачивается по тарифу, равному 0,0335 руб./((кВт·ч)». Таким образом, если считать, что действующий одноставочный тариф в размере 0,1484 руб./((кВт·ч) в коммунально-бытовом секторе признан в Минэнерго оптимальным (т. е. не дотируемым), то введение нового тарифа на электроэнергию для названной выше категории жилых домов (по величине в $0,1484 : 0,0335 = 4,42$ раза меньше действующего), хотя и обеспечит снижение платы за электропотребление, но в то же время исключит стимулы для ее экономии. Это имеет место уже и сейчас при централизованном теплоснабжении, когда потребители оплачивают только порядка 20 % стоимости подаваемой с горячей водой теплоты.

Перспективы энергосбережения в агроэнергетике

Уплотнение графиков нагрузок, аналогичных приведенным на рис. 1, и в целом графиков электрических нагрузок в технологических процессах сельскохозяйственной отрасли с применением сложных тарифов позволяет повысить технико-экономические показатели генерации и передачи энергии и снизить плату за электропотребление, т. е. обе режимно взаимодействующие стороны получают определенный положительный результат. К этому результату добавляется и другой, обусловленный тем, что за последние десятилетия в энергетике сельского хозяйства существенно продвинулись в своем развитии силовая электроника и микропроцессорная техника, на основе которых разработаны статические преобразователи частоты, обеспечивающие частотное управление асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором с высокими энергетическими и динамическими показателями. Так как электроприводами потребляется более 60 % электроэнергии, из которых 90 % относится к асинхронному электроприводу, то в условиях дефицита энергоресурсов это делает особо острой проблему энергосбережения. Современный электропривод в сельском хозяйстве развивается по направлениям:

- наибольшего приближения электродвигателя с приводным валом или совмещения с рабочей машиной;
- организации регулирования параметров (скорости, момента, угла поворота и т. д.), что расширяет его функциональные возможности и повышает энергоэффективность технологических процессов;

– повышения экономичности электропривода;
– совершенствования процессов автоматизации, информатизации и контроля технического состояния.

В сельском хозяйстве применяется также ряд таких технологий, где электрическая энергия используется без применения установок электропривода, например облучение животных, подогрев воды и корма, сушка продукции, освещение и т. д. В каждом из этих процессов имеются свои требования к качеству электрической энергии, обеспечить которое невозможно при широком использовании ВИЭ и их незначительной единичной мощности. Хотя некоторые авторы, например [10], полагают, что ВИЭ можно использовать без отдачи энергии в централизованную сеть, так как альтернативная энергия эффективна (рентабельна) только в тех случаях, когда она потребляется энергоемкими технологиями. Изложенное в [10] мнение сомнительно, поскольку последовательная и целесообразная реализация мероприятий в рассмотренном выше формате 4Д, касающихся распределительных сетей, привела к совершенствованию схем электрообеспечения потребителей, представленных на рис. 2. Здесь взаимное резервирование питания от смежных подстанций (ПС № 1, ПС № 2) с напряжением 35 кВ и выше дополнено питанием от источников распределенной генерации (РГ-1–РГ-3), секционированием участков линий с помощью реклоузеров РК-1–РК-4 и установкой средств защиты, автоматики и энергоучета в реальном времени с тем, чтобы реализовать в том числе и функции контроля нагрузок, оценки показателей качества электрической энергии и косвенного управления нагрузками с применением электронных счетчиков Wh .

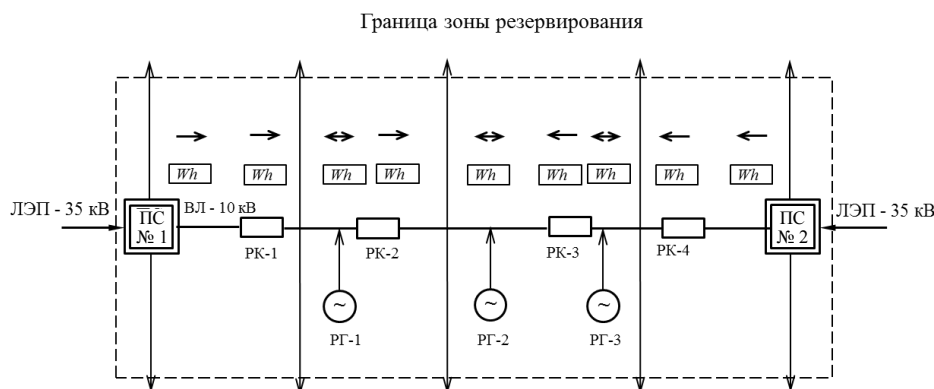


Рис. 2. Схема взаимного резервирования от смежных подстанций с использованием реклоузеров на магистральной линии, источников распределенной генерации и технических средств автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии

Fig. 2. The scheme of mutual reservation from adjacent substations using reclosers on the main line, distributed generation sources and technical means of an automated power control and accounting system

Для построения сети, аналогично приведенной на рис. 2, необходимы существенные финансовые средства, учитывая к тому же, что сельские распределительные сети в основном исчерпали срок службы. По этой причине следует иметь в виду, что задачи интеллектуализации контроля и управления электрическими нагрузками аграрных потребителей совместно

с комплексом других перечисленных выше задач решаются в условиях глубокой модернизации этих сетей с привлечением в том числе и новых источников распределенной генерации с целью повышения надежности электроснабжения потребителей всех категорий и групп.

ВЫВОДЫ

1. Для обеспечения адресной надежности потребителей электрической энергии в сельском хозяйстве необходимо пересмотреть соотношение ее объемов в пользу распределенной генерации с учетом того, что каждый потребитель первой категории должен быть обеспечен собственными энергоисточниками в виде энергетической триады [11, 12], в состав которой обязательно включается накопитель энергии соответствующей мощности, учитывая неравномерность суточного графика работы модуля ФЭС.

2. Совершенствованию тарифных систем в электроэнергетике должна сопутствовать ликвидация перекрестного субсидирования, учитывая, что при ее наличии все выпадающие доходы (ущербы) энергосистемы покрываются за счет снижения рентабельности предприятий, вынужденных увеличивать в этом случае цены на продукцию.

3. Сельское хозяйство республики имеет достаточно широкую возможность роста объемов электропотребления за счет внедрения электронагрева, вентиляции, сушки, регулируемого электропривода в различных технологических процессах. В то же время совершенствование этих процессов обеспечивает возможность экономии энергии, что приводит к повышению энергоэффективности и снижению себестоимости продукции.

4. Для обеспечения высоких требований по уровню надежности электроснабжения потребителей электроэнергии в области сельского хозяйства централизованное электроснабжение должно дополняться источниками распределенной генерации, работающими параллельно с основными, учитывая как режимные условия (переменные графики генерации источников распределенной генерации), так и возможности обеспечения требуемых параметров энергии и прежде всего ее качества, соответствующего действующему стандарту.

ЛИТЕРАТУРА

1. Республиканское унитарное предприятие электроэнергетики «ОДУ». 30 лет. Минск, 2018. 16 с.
2. Филиппович, А. Г. Распределенная генерация как механизм балансирования и резервирования мощностей белорусской энергосистемы / А. Г. Филиппович // Энергоэффективность. 2018. № 11. С. 17–21.
3. Козловская, В. Б. Несимметричные режимы работы линий наружного освещения / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 3. С. 232–246. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-232-246>.
4. Фурсанов, М. И. Расчет технологического расхода (потерь) электроэнергии в современных распределительных электрических сетях 0,38–10 кВ / М. И. Фурсанов, А. А. Золотой, В. В. Макаревич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 5. С. 408–422. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-408-422>.
5. Забелло, Е. П. К вопросу об интеграции объектов распределенной генерации в энергосистему / Е. П. Забелло // Энергетическая стратегия. 2019. № 3. С. 23–27.

6. Тарифы на электрическую и тепловую энергию для населения: постановление Совета Министров Республики Беларусь от 30.12.2013 № 166 (в редакции постановления Совета Министров Республики Беларусь от 01.07.2019).
7. Будзко, И. А. Электроснабжение сельского хозяйства / И. А. Будзко, Т. Б. Лещинская, В. И. Сукманов. М.: Колос, 2000. 536 с.
8. Сверчкова, Ж. В. Первый на Витебщине полностью электрифицированный дом / Ж. В. Сверчкова, Л. Е. Стульбо // Энергоэффективность. 2019. № 6. С. 24.
9. Забелло, Е. П. Экономические стимулы совершенствования систем энергообеспечения и энергопотребления в коммунально-бытовом секторе / Е. П. Забелло // Энергетика и ТЭК. 2017. № 3. С. 12–16.
10. Бринь, А. Возобновляемые источники энергии в отечественном аграрном производстве / А. Бринь, А. Косько, А. Синенький // Наука и инновации. 2019. № 2. С. 33–36.
11. Забелло, Е. П. Перспективы энергетической триады / Е. П. Забелло // Энергетика и ТЭК. 2016. № 9. С. 44–48.
12. Забелло, Е. П. Косвенное управление электрическими нагрузками в условиях развития распределенной генерации энергии / Е. П. Забелло, А. С. Качалко // Энергетическая стратегия. 2019. № 2. С. 23–27.

Поступила 17.09.2019 Подписана в печать 30.12.2019 Опубликовано онлайн 31.03.2020

REFERENCES

1. *Republican Unitary Enterprise of Electric Power Industry "ODU". 30 Years.* Minsk, 2018. 16 (in Russian).
2. Filippovich A. G. (2018) Distributed Generation as a Mechanism for Balancing and Reserving Capacities of the Belarusian Power System. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, (11), 17–21 (in Russian).
3. Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N. (2019) Asymmetrical Modes of Outdoor Lighting Lines. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (3), 232–246 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-232-246>.
4. Fursanov M. I., Zalotoy A. A., Makarevich V. V. (2018) Calculation of Technological Consumption (Loss) of Electricity in Modern 0.38–10 kV Electrical Distribution Networks. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (5), 408–422 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-408-422>.
5. Zabello E. P. (2019) Towards the Issue of Integration of Distributed Generation Facilities in the Power System. *Energeticheskaya Strategiya [Power Engineering Strategy]*, (3), 23–27 (in Russian).
6. *Tariffs for Electric and Thermal Energy for the Population: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of 30.12.2013 No 166 (as Amended by the Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of 01.07.2019).* Available at: https://base.spinform.ru/show_doc.fwx?rgn=64853 (in Russian).
7. Budzko I. A., Leshchinskaya T. B., Sukmanov V. I. (2000) *Electricity Supply for Agriculture.* Moscow, Kolos Publ. 536 (in Russian).
8. Sverchkova Zh. V., Stul'bo L. E. (2019) The First Fully Electrified House in Vitebsk Region Was Presented to the Conference Participants. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, (6), 24. (in Russian).
9. Zabello E. P. (2017) Economic Incentives for Improving Energy Supply Systems and Energy Consumption in the Public Sector. *Energetika i TEK [Power Engineering and Fuel and Energy Complex]*, (3), 12–16 (in Russian).
10. Brin' A., Kos'ko A., Sinen'kii A. (2019) Renewable Energy Sources in Domestic Agricultural Production. *Nauka i Innovatsii = Science and Innovations*, (2), 33–36 (in Russian).
11. Zabello E. P. (2016) Prospects for the Energy Triad. *Energetika i TEK [Power Engineering and Fuel and Energy Complex]*, (3), 44–48 (in Russian).
12. Zabello E. P., Kachalko A. S. (2019) Indirect Control of Electrical Loads in Conditions of Development of Distributed Energy Generation. *Energeticheskaya Strategiya [Power Engineering Strategy]*, (2), 23–27 (in Russian).

Received: 17 September 2019 Accepted: 30 December 2019 Published online: 31 March 2020

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-129-137>

УДК 621.311.1

Специализированные мобильные приложения как средство оптимизации системы энергоснабжения Республики Беларусь

М. И. Фурсанов¹⁾, П. А. Сазонов¹⁾

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

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

Реферат. Интенсивное развитие сектора мобильных платформ (смартфоны, умные часы, фитнес-браслеты и прочая носимая электроника) в последние четыре года привело к колоссальному росту рынка мобильных приложений-сервисов. Западные страны активно их внедряют для бытовых пользователей энергоресурсов. В Беларуси наблюдается положительная динамика числа пользователей приложений-сервисов, каждый год удается привлечь 7 % уникальных клиентов. В статье проанализирован опыт внедрения и эксплуатации мобильного приложения для энергосистем. Отслежена динамика рынка мобильных приложений: выявлено количество времени, проводимого человеком за устройством, представлены суммарные траты денежных средств в приложении на данный момент, спрогнозирован рост расходов внутри приложений. Продемонстрирована потенциальная польза для бизнеса и конечного потребителя услуг от введения мобильных приложений-сервисов. Рассмотрены свойства, основные качества и преимущества перед традиционными видами взаимодействия «потребитель – поставщик». Выявлен ряд особенностей для успешного функционирования мобильного приложения в энергосистеме Беларуси. Изучен процесс создания программного обеспечения для смарт-устройств и предложен функционал с целью привлечения новых пользователей, необходимый мобильному приложению для энергосистемы. Представлен особый алгоритм для запуска и успешного «жизненного цикла» мобильного приложения, позволяющий максимально эффективно эксплуатировать и развивать мобильные приложения, а также избежать наиболее распространенных ошибок на этапах разработки и запуска. Внедрение мобильного приложения в энергосистему Республики Беларусь в долгосрочной перспективе в значительной степени повысит лояльность потребителей, упростит взаимодействие с пользователями, позволит выстраивать новые модели распространения электрической энергии, а следовательно, регулировать спрос на энергоресурсы.

Ключевые слова: мобильное приложение, энергосистема, энергетика, услуга, потребитель, бизнес-модель, экономика, алгоритм

Для цитирования: Фурсанов, М. И. Специализированные мобильные приложения как средство оптимизации системы энергоснабжения Республики Беларусь / М. И. Фурсанов, П. А. Сазонов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 2. С. 129–137. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-129-137>

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

Specialized Mobile Applications as Means of Optimizing the Power Supply System of the Republic of Belarus

M. I. Fursanov¹⁾, P. A. Sazonov¹⁾

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

Abstract. The active development of the mobile platforms sector such as smartphones, smart watches, fitness bracelets and other wearable electronic devices in the last 4 years has caused a huge growth of the market of mobile applications-services. Western countries are actively implementing mobile applications-services for household energy users. In Belarus, there is a positive dynamics in the number of active users of applications-services, every year it is possible to attract 7 % of unique customers. In the present paper the experience of implementation and operation of the mobile application for power systems is analyzed. The dynamics of the market of mobile applications-services has been traced: the amount of time spent by the person in interaction with the device was determined as well as the total expenditure of funds in the application at the moment; also, the growth of expenses within the applications was forecasted. The potential benefits for business and end-users of services from the implementation of mobile applications-services were demonstrated. Their properties, main qualities and advantages over traditional methods of “business – client” interaction are considered. A number of features needed for the successful functioning of the mobile application in the power system of Belarus are identified. The process of creating software for smart devices has been studied and the functionality needed by the mobile application for the power system has been proposed for attracting new users. A special algorithm for the launch and successful “life cycle” of a mobile application has been proposed. It allows to operate and develop mobile applications-services as efficiently as possible, as well as to avoid the most common errors at the stages of their development and launch. The implementation of a mobile application in the power system of the Republic of Belarus, in the long-term, will significantly increase customer loyalty, simplify interaction with users, make it possible to build new models of distribution of electricity, and, consequently, regulate the demand for energy resources.

Keywords: mobile application, power system, power engineering, service, consumer, business model, economy, algorithm

For citation: Fursanov M. I., Sazonov P. A. (2020) Specialized Mobile Applications as Means of Optimizing the Power Supply System of the Republic of Belarus. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (2), 129–137. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-129-137> (in Russian)

Введение

Одно из основных направлений в современном мире – структурированное развитие подавляющего большинства сфер деятельности человека. Это подталкивает людей к тому, что обязательным дополнением к любому товару или услуге является сервис. Высокий уровень сервиса позволяет получить наиболее лояльного потребителя [1–9].

Во многих странах мира, таких как США, Канада, Германия, Франция, Украина, эффективное, а главное, качественное снабжение потребителя энергоресурсами осуществляется за счет массового внедрения мобильного приложения (МП) для энергосистем в рамках конкретного государства [1–4]. Приложение позволяет выбрать наиболее привлекательную тарифную ставку, а также обеспечивает максимальный фидбэк для энергоснабжающей компании, что в перспективе помогает решать технические и другие сопутствующие вопросы в максимально сжатые сроки.

В настоящее время существует проблема излишней идеализированности электрической энергии (ЭЭ). Рассмотрим ее на примере бытового потребите-

ля, который получает X кВт·ч электроэнергии (при 220 В и 50 Гц) 24 ч в сутки семь дней в неделю и обязан оплатить их согласно текущему тарифу на ЭЭ. Зачастую складывается ситуация, когда имеет место повышенное/пониженное напряжение в сети, также не исключена вероятность, что потребитель вовсе останется без электроснабжения. Следовательно, услуга оказана некачественно, а тариф на ЭЭ никак не учитывает данный факт: мобильное приложение для энергетики позволит обеспечить потребителей энергоресурсами предельно эффективно и в случае нештатной ситуации своевременно отреагировать [5, 10].

Специализированные мобильные приложения в энергоснабжении

Введение специализированных мобильных приложений (СМП) в сферы энергоснабжения приносит ряд преимуществ по сравнению с традиционными видами взаимодействия «потребитель – поставщик ЭЭ». Специализированное мобильное приложение – программное обеспечение, предназначенное для работы на мобильных платформах, таких как смартфоны, планшеты, часы, очки и другие, с целью выполнения функций, заложенных в требованиях отрасли, в которой оно будет применяться. СМП – это возможность информирования потребителя в режиме реального времени обо всех изменениях в тарифах, проверки и оплаты счетов, обратной связи в режиме онлайн, а также экономия финансовых средств за счет упразднения устаревшей системы получения счетов за энергоресурсы.

В развитых западных странах возможности и массовость мобильных телефонов активно используются. Например, в Швейцарии с 2014 г. работает система информирования абонентов, а также предоплаты за энергоресурсы посредством мобильной электроники и мобильного программного обеспечения. На Украине внедрение СМП было запланировано на 2019 г. в рамках проекта «Прозрачная энергетика»; Национальная комиссия Украины, осуществляющая государственное регулирование в сферах энергетики и коммунальных услуг, совместно с аналитическим центром DiXi Group презентовали свое видение МП для потребителей энергоресурсов [1]. Приложение призвано в значительной степени повысить эксплуатационные свойства системы информирования потребителей, а также применяется для борьбы с недобросовестными поставщиками электрической и газовой энергии.

С каждым годом развивается рынок мобильных приложений, а вместе с ним увеличивается использование МП на современных платформах: смартфоны, планшеты, часы. Apple Store и Google Play заявили о 113 млрд загрузок приложений и игр на сумму 76 млрд дол. в 2018 г., что на 20 % больше показателей 2017-го. Аналитическая компания App Annie прогнозирует оборот рынка мобильных приложений в 6,3 трлн дол. к 2022 г. В качестве драйвера роста выступит повышение объема покупок товаров и услуг в приложениях сервиса с «привязанными» банковскими платежными картами [2]. Процент пользователей мобильной электроники в мире, имеющих мобильные приложения для платежей, и процент реального использования подобных приложений демонстрирует рис. 1.



Рис. 1. Действия с мобильными приложениями среди пользователей

Fig. 1. User actions in relation to mobile applications

Как отмечалось ранее, ожидается рост числа активных пользователей мобильных платформ, следовательно, увеличится время, потраченное в приложениях, и оборот денег на рынке приложений, включающий микротранзакции, издержки на рекламу и электронную коммерцию. Согласно прогнозам [3], к 2021 г. траты в приложениях возрастут с 379 до 1008 дол. на человека. Процентное отношение более-менее активных пользователей мобильного программного обеспечения (МПО) к общему количеству пользователей смарт-устройств [4] демонстрирует схема, приведенная на рис. 2.



Рис. 2. Активность использования мобильных приложений в странах СНГ

Fig. 2. Mobile applications usage activity in CIS countries

По мнению авторов статьи, внедрение специализированного мобильного приложения на территории Республики Беларусь позволит оптимизировать систему энергоснабжения. У энергетиков будет надежный и эффективный инструмент для общения с потребителями, для которых приложение максимально сократит затраты времени на всевозможные платежи благодаря автоматизации процесса. Кроме того, пользователи смогут получать интересующую информацию и отстаивать свои права в случае некачественно оказанной услуги [11].

Энергетика является важнейшим фактором развития экономики. Успешная бизнес-модель позволяет работать в так называемый «плюс» – положительная прибыль, которую можно использовать для модернизации электроэнергетической системы, найма квалифицированного персонала, приобретения вспомогательного оборудования, техники [5].

Потенциальная польза от внедрения мобильного приложения

В 2017 г. наступил переломный момент для информационной индустрии: доля пользователей, которые получали доступ в Интернет на мобильной платформе Android, составила 37,93 % против 37,91 % в операционной системе (ОС) Microsoft. В начале 2019 г. корпорация Google утверждала, что количество пользователей Интернета на мобильных платформах в странах СНГ составляло уже 61,00 % от общего числа пользователей глобальной сети [6]. Подобные темпы роста стали возможны благодаря внедрению на мобильный рынок огромного количества высококачественного программного обеспечения, позволяющего приобрести товары и услуги высшего качества [7].

От внедрения в энергетiku государства мобильного приложения преимущества от его использования получают как поставщики услуг электро- и газоснабжения, так и его потребители.

Поставщик услуги, например ГПО «Белэнерго», получает такие преимущества, как:

- повышение уровня лояльности клиентов. За счет постоянного стимулирования интереса потребителя к концерну – информирование о новейших разработках, перспективах в области энергетики Республики Беларусь, вводе новых объектов и т. д.;

- осведомленность о клиентской базе. При наличии мобильного приложения у большинства либо же у всех потребителей энергии концерн может иметь исчерпывающие данные о наиболее аварийных регионах, местах с неудовлетворительным качеством ЭЭ, а также знать, какие пожелания/идеи по развитию энергетики есть у потребителей;

- функция быстрого общения. Потребитель может в любое время оставить свое предложение/замечание по работе абсолютно любой структуры в области электроснабжения. Также благодаря наличию на мобильных платформах push-уведомлений достаточно легко доносить информацию о возможных перебоях в энергоснабжении, сроках ликвидации аварий и о последующем запитывании конкретного района электрической сети;

- перевод потребителей на систему предоплаты за пользование услугами электро- и газоснабжения. В развитых западных странах подобная система получила широкое распространение, так как практически исключает факты хищения ЭЭ. В Республике Беларусь активно ведутся работы по замене индукционных приборов учета ЭЭ на цифровые. Абсолютно любой цифровой прибор учета может опрашиваться дистанционно путем GSM, PLC либо радиосвязи, следовательно, есть возможность создать цифровую базу и перевести потребителей электроэнергии на систему предоплаты;

- возможность экономить денежные средства путем создания единой системы для уплаты за пользование энергоресурсами и коммунальными услугами в мобильном приложении. Счета за услуги, распечатанные на бумаге, – это достаточно серьезные затраты и неудобства. Численность занятого населения Республики Беларусь по видам экономической деятельности в 2018 г. составляла 4335,5 тыс. человек [8]. Представим, что стоимость отправки счета в бумажном варианте – всего 1 коп., тогда суммарный расход денежных средств – 43355 бел. руб. С учетом средств на закупку серверного оборудования для хранения информации о потребителях, затрат на разработку МПО и эксплуатацию системы, а также предпо-

ложения, что хотя бы половина занятого в экономике населения будет пользоваться мобильным приложением, уже через два месяца представится возможность наблюдать положительный экономический эффект.

Поскольку любая услуга ориентирована в первую очередь на клиента, потребитель энергоресурсов благодаря мобильному приложению получает привилегии:

- осведомленность. Мобильное приложение предоставляет пользователю возможность быть вовлеченным в процессы, происходящие в области энергетики государства. Потребитель информируется о том, куда идет часть его налогов и что будет приносить пользу в первую очередь ему;
- всегда под рукой. В приложение можно зайти в любое время и в любом месте: оплатить услуги, получить консультацию, подать жалобу. Значительная экономия времени на оплату коммунальных услуг. Постепенное внедрение в приложение полезных и нужных возможностей для привлечения новой аудитории, например автоматический расчет денежных средств для оплаты за использованную ЭЭ: для пользователей системы Smart House расчет производится автоматически, для всех остальных потребуется ручной ввод данных об электроприборах, установленных в жилом помещении. Реализация интерфейса с описанным функционалом изображена на рис. 3.

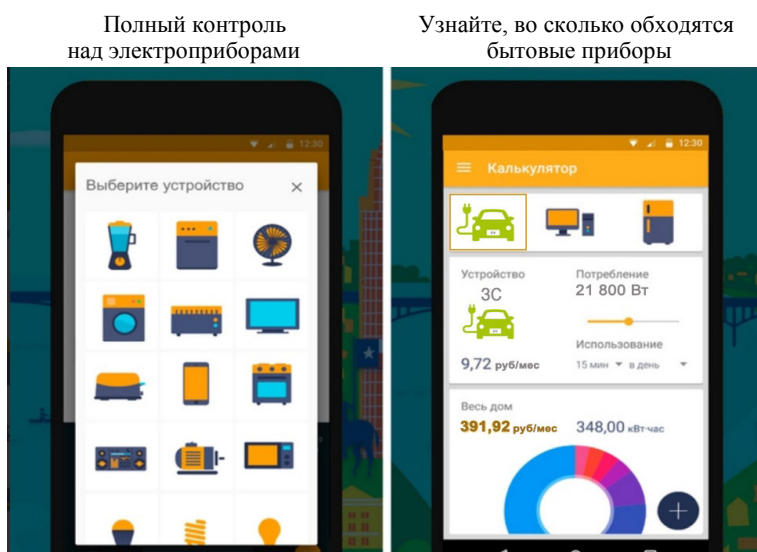


Рис. 3. Пример дополнительного функционала приложения

Fig. 3. An example of additional functionality of the application

При разработке мобильного приложения и последующего успешного его внедрения в экономику государства требуют особого внимания следующие пункты:

- чем МПО будет полезно пользователям и бизнесу, также необходимо определить целевую аудиторию (ЦА);
- проект приложения, включающий в себя создание «карты» приложения, представляющей собой прототип МПО, по которому в перспективе будет вестись разработка;
- дизайн, графика: красивый и удобный интерфейс обеспечивает простоту и визуальный комфорт при использовании приложения;

- сборка – этап, на котором идет создание функций и вкладок, наполнение контентом и настройка внешнего вида приложения;
- тестирование обеспечивает поиск и устранение ошибок в работе кода и интерфейса приложения на устройствах ЦА;
- последующие поддержка и развитие приложения подразумевают регулярные обновления, позволяющие соответствовать растущим требованиям пользователей.

Авторский алгоритм разработки и запуска МПО для коммерческого использования на основе анализа истории запуска и эксплуатации успешных во всем мире приложений со встроенными покупками и микротранзакциями (Uber, Facebook, Duolingo) показан на рис. 4.



Рис. 4. Алгоритм разработки и запуска мобильного приложения

Fig. 4. Algorithm for mobile application development and launch

При создании алгоритма изучены процесс запуска литовского приложения в сфере энергетики Elektrum и менее успешный запуск проекта EnergyOnline от украинской энергосистемы [9, 10]. Обозначим, что МПО – это сервис, сопутствующий оказываемой услуге, – продаже энергоресурсов. Предлагаемый подход к разработке позволяет обеспечить положительный опыт использования приложения среди населения, который ведет к росту аудитории и последующей популяризации сервиса. Кроме того, алгоритм позволяет максимально эффективно – просто и экономично – эксплуатировать и расширять возможности приложения и системы, связанной с предоставлением услуг населению.

Применение сегодня мобильного приложения в области энергетики, которым сможет пользоваться любой гражданин страны на персональном мобильном телефоне, обеспечит экономию средств бюджета завтра. Переход на принципиально новую платформу для информирования и обратной связи, а также для совершения платежей за использование энергоресурсов населением – это проект с достаточно простой реализацией. Время – самый ценный ресурс, приложение – способ его экономить как клиенту, так и бизнесу.

ВЫВОД

Активное использование мобильных платформ в современном обществе открывает новые возможности для потенциальных клиентов, а также продавцов услуг. В первую очередь это выход на принципиально новый уровень сервиса, сопутствующего оказываемой услуге: круглосуточная информационная поддержка пользователей системы, возможность сократить объем денежных средств, расходуемых на выставление счетов и информирование потребителей, шанс внедрить систему предоплаты за электроэнергию. Ввод в работу Белорусской атомной электростанции вполне может стимулировать интерес потребителя к электрическим автомобилям, отказ от приборов на природном газе в пользу аналогичных электрических. Перечисленные факторы приводят к необходимости разработки энергосистемой новых способов предоставления услуг населению; один из них – специализированные мобильные приложения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Национальная комиссия по государственному регулированию в сфере энергетики [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nerc.gov.ua/>. Дата доступа: 01.04.2019.
2. Каталоги с информацией о российских и иностранных ИТ-решениях, технологиях и поставщиках информационных систем информатизации и интеграции [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.tadviser.ru/>. Дата доступа: 17.04.2019.
3. App Annie – единая платформа для аналитики и получения данных о состоянии рынка мобильных приложений [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://appannie.com/>. Дата доступа: 11.04.2019.
4. Ассоциация электронных коммуникаций (РАЭК) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://raec.ru/>. Дата доступа: 16.04.2019.

5. Студия мобильной разработки Lampa [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.lampalampa.net/>. Дата доступа: 21.04.2019.
6. Google пресс-группа [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.blog.google/>. Дата доступа: 23.04.2019.
7. Энциклопедия российского бизнеса [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.openbusiness.ru/>. Дата доступа: 01.05.2019.
8. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://belstat.gov.by/>. Дата доступа: 03.05.2019.
9. Хабр – ресурс для IT-специалистов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/>. Дата доступа: 06.05.2019.
10. Студия разработки мобильных приложений для бизнеса AppCraft [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://appcraft.pro/blog/>. Дата доступа: 06.05.2019.
11. Фурсанов, М. И. Схемно-конструктивные решения и информационное обеспечение городских электрических сетей в условиях SMART GRID / М. И. Фурсанов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 5. С. 393–406. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-5-393-406>.

Поступила 28.06.2019 Подписана в печать 30.09.2019 Опубликовано онлайн 31.03.2020

REFERENCES

1. *National Energy and Utilities Regulatory Commission, Ukraine*. Available at: <http://www.nerc.gov.ua/>. (Accessed 1 April 2019).
2. *Tadviser. State. Business. IT*. Available at: <http://www.tadviser.ru/>. (Accessed 17 April 2019).
3. *App Annie – a Single Platform for Analytics and Data on the State of the Mobile Application Market*. Available at: <http://appannie.com/>. (Accessed 11 April 2019) (in Russian).
4. *Association for Electronic Communication (RAEC)*. Available at: <https://raec.ru/>. (Accessed 14 April 2019) (in Russian).
5. *Lampa: a Comfy Studio of Mobile App Development*. Available at: <http://www.lampa.lampa.net/>. (Accessed 21 April 2019) (in Russian).
6. *Google*. Available at: <https://www.blog.google/>. (Accessed 23 April 2019).
7. *Encyclopedia of Russian Business*. Available at: <https://www.openbusiness.ru/>. (Accessed 1 May 2019) (in Russian).
8. *National Statistical Committee of the Republic of Belarus*. Available at: <http://belstat.gov.by/>. (Accessed 3 May 2019) (in Russian).
9. *Habr: a Community of IT Professionals*. Available at: <https://habr.com/>. (Accessed 6 May 2019) (in Russian).
10. *AppCraft Studio: Mobile App Development from 30 Days*. Available at: <https://appcraft.pro/>. (Accessed 6 May 2019) (in Russian).
11. Fursanov M. I. (2017) Circuit-Design Solutions and Information Support of City Electric Networks in the Conditions of the SMART GRID. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (5), 393–406. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-5-393-406> (in Russian).

Received: 28 June 2019

Accepted: 30 September 2019

Published online: 31 March 2020

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-138-150>

УДК 621.7

Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик оребрённых плоских труб аппарата воздушного охлаждения масла

**С. В. Тиунов¹⁾, А. Н. Скрыпник²⁾, Г. С. Маршалова³⁾, В. М. Гуреев²⁾,
И. А. Попов²⁾, Р. Г. Кадыров^{2,4)}, А. Д. Чорный⁵⁾, Ю. В. Жукова⁵⁾**

¹⁾ ООО фирма «Термокам» (Камские Поляны, Российская Федерация),

²⁾ Казанский национальный исследовательский технический университет
имени А. Н. Туполева – КАИ (Казань, Российская Федерация),

³⁾ Белорусский государственный технологический университет (Минск,
Республика Беларусь),

⁴⁾ АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт центробежных
и роторных компрессоров имени В. Б. Шнеппа» (Казань, Российская Федерация),

⁵⁾ Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (Минск,
Республика Беларусь)

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

Реферат. Аппараты воздушного охлаждения представляют собой класс теплообменных агрегатов, широко применяемых на практике. Однако они обладают рядом недостатков, обусловленных малым значением коэффициента теплоотдачи со стороны воздуха и большим сопротивлением оребренных трубных пучков. Это приводит к большим габаритам и металлоемкости самого устройства, к необходимости развивать высокую мощность привода вентилятора, что снижает энергетическую эффективность. Цель исследований – определение оптимальных геометрических размеров оребренных плоских теплообменных труб, получаемых методами экструзии и деформирующего резания, обеспечивающих снижение массогабаритных характеристик теплообменной секции аппаратов воздушного охлаждения. На основании проведенных экспериментов с семью различными образцами теплообменных секций, отличающихся шагом и высотой ребер, шириной секции трубы, высотой плоской трубы и количеством внутренних каналов, установлена эффективность каждой секции по таким показателям, как: тепловая мощность, тепловая эффективность, удельное термическое сопротивление теплопередаче, критерии М. В. Кирпичева и В. М. Антутьева. Полученные экспериментальные данные и анализ пассивного метода воздействия на пристенную область теплопередающей поверхности за счет оребрения методом деформирующего резания показывают, что максимальное значение критериев эффективности наблюдается у образца № 5 с наибольшей высотой (0,008 м) и минимальным шагом ребер (0,0025 м) в исследованном диапазоне. Таким образом, при сохранении геометрических размеров аппарата воздушного охлаждения масла за счет использования улучшенной секции теплообменного аппарата (образец № 5) возможно увеличение количества отводимой теплоты или уменьшение

Адрес для переписки

Чорный Андрей Дмитриевич
Институт тепло- и массообмена
имени А. В. Лыкова НАН Беларуси
ул. П. Бровки, 15,
220072, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 284-23-87
anchor@hmti.ac.by

Address for correspondence

Chorny Andrey D.
A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute
of the National Academy of Sciences of Belarus
15, P. Brovki str.,
220072, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 284-23-87
anchor@hmti.ac.by

массогабаритных характеристик при сохранении тепловой мощности и, как следствие, снижение затрат мощности на прокачку и повышение теплогидравлической эффективности аппарата в целом.

Ключевые слова: аппарат воздушного охлаждения, оребрение, теплопередача, методы экструзии и деформирующего резания, тепловая мощность, тепловая эффективность, удельное термическое сопротивление теплопередаче, критерий энергетической эффективности

Для цитирования: Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик оребренных плоских труб аппарата воздушного охлаждения масла / С. В. Тиунов [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 2. С. 138–150. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-138-150>

Experimental Investigation of Thermal and Hydraulic Characteristics of Finned Flat Tubes of the Oil Air Cooling Device

S. V. Tiunov¹⁾, A. N. Skrypnik²⁾, G. S. Marshalova³⁾, V. M. Gureev²⁾,
I. A. Popov²⁾, R. G. Kadyrov^{2,4)}, A. D. Chorny⁵⁾, Y. V. Zhukova⁵⁾

¹⁾LLC Firm “Termokam” (Kamskie Polyany, Russian Federation),

²⁾Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan, Russian Federation),

³⁾Belarusian State Technological University (Minsk, Republic of Belarus),

⁴⁾JSC “Research and Design Institute of Centrifugal Pumps and Rotary Compressors named after V. B. Schnepf” (Kazan, Russian Federation),

⁵⁾A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Air cooling devices are heat exchange units that are widely used in practice. However, they have a number of disadvantages due to the low value of the heat transfer coefficient from the air and the high resistance of finned tube bundles, which leads to large dimensions and the metal content of the device itself, to the need to develop a high power ventilator drive, but also to the need to demonstrate reduced energy efficiency. The objective of the present work is to determine optimal geometric sizes of finned flat heat exchange tubes manufactured by the techniques of extrusion and deforming cutting that reduce the weight and size characteristics of the heat exchange section of air cooling devices. The experimental studies of seven various samples of heat exchange sections, being different in fin pitch and height, tube section width, flat tube height and a number of inner channels, have determined the performance of each section with the use of the following criteria: thermal power, thermal efficiency, specific thermal heat transfer resistance, M. V. Kirpichev and V. M. Antuf'ev's criteria. The obtained experimental data and the analysis of the passive method of enhancement in the near-wall area of the heat transfer surface finned by deforming cutting has shown that sample No 5 has maximum value of the performance criteria when the maximum height of a fin is 0.008 m and the minimum pitch of a fin is 0.0025 m over the investigated sample range. Thus, when the sizes of an oil air cooling device are maintained by using the amended heat transfer section of sample No 5, the amount of removed heat can be increased or the mass and dimensions of the device can be decreased while maintaining thermal power and, as a result, the power consumption for pumping can be decreased and the thermal-hydraulic performance of the device as a whole can be increased.

Keywords: air cooling device, finning, heat transfer, extrusion and deforming cutting techniques, thermal power, thermal performance, specific thermal heat transfer resistance, energy performance criterion

For citation: Tiunov S. V., Skrypnik A. N., Marshalova G. S., Gureev V. M., Popov I. A., Kadyrov R. G., Chorny A. D., Zhukova Y. V. (2020) Experimental Investigation of Thermal and Hydraulic Characteristics of Finned Flat Tubes of the Oil Air Cooling Device. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (2), 138–150. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-138-150> (in Russian)

Введение

Аппараты воздушного охлаждения (АВО) являются эффективными промышленными теплообменниками, широко распространенными в химической, нефтехимической [1], целлюлозно-бумажной промышленности, в металлургии [2, 3], энергетике [4, 5], в системах воздушного отопления, на компрессорных станциях для охлаждения энергоносителей и конденсации отработавшего пара, на тепловых электростанциях для охлаждения рециркуляционной воды в воздушно-конденсационных установках [6–8], для систем отопления зданий и сооружений [9], в качестве систем аварийного расхолаживания реакторов [10], а также в возобновляемой энергетике, в частности на геотермальных станциях [11]. В настоящее время, по данным [12], в странах Евразийского экономического союза эксплуатируется около 52000 АВО с установленной мощностью $1,93 \cdot 10^6$ кВт.

Интенсификации эксплуатационных характеристик АВО посвящено большое количество научных публикаций, например [13]. В [14, 15] представлены результаты по оптимизации работы вентиляторов; в [16] – результаты по оптимизации конструкции ребер аппаратов; улучшению аэродинамических характеристик воздушного тракта посвящены [17, 18]; оценка эффективности использования жалюзийных устройств представлена в [19]. В [20] приведены результаты по внедрению двухступенчатого охлаждения, в [21] – по выбору оптимальной конструкции диффузора, в [22] – по критерию выбора и применению различных способов регулирования.

В [23] отмечается, что для расчета необходимой площади теплообменной поверхности АВО используется средняя для района температура воздуха, поэтому основную часть времени данные теплообменные аппараты функционируют с большим запасом площади, как упоминается в [24, 25]. Недостатки стандартной конструкции АВО – большие габариты поверхности охлаждения, что, в свою очередь, приводит к повышенной металлоемкости теплообменных секций и аппарата в целом; высокая потребляемая электрическая мощность привода вентилятора, вызванная большими потерями давления охлаждающего воздуха при его прокачке через многорядный пакет оребренных труб, характеризуемый дополнительно большим количеством труб в ряду. Данные недостатки обусловлены малыми значениями коэффициента теплопередачи и характерны для всех газожидкостных поверхностных теплообменников. Невысокая интенсивность теплопередачи предопределена низким значением коэффициента теплопроводности воздуха, используемого в качестве охлаждающего теплоносителя. Вследствие этого даже при принудительном движении воздуха коэффициент теплоотдачи в среднем не превышает $50\text{--}150 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, в то время как коэффициент теплоотдачи внутри труб по стороне охлаждаемого продукта находится в интервале $600\text{--}4000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Таким образом, АВО свойственна пониженная энергетическая эффективность [24–27], для увеличе-

ния которой необходимо использовать различные методы и типы интенсификаторов теплообмена, в том числе развивать поверхности теплообмена посредством оребрения [25–29].

Цель работы – исследование гидродинамических характеристик и параметров теплообмена при течении теплоносителя в образцах теплообменной секции АВО и определение оптимальных геометрических размеров оребренных плоских теплообменных труб, обеспечивающих при фиксированных энергетических затратах приводной техники АВО прокачку масла необходимых параметров и снижение массогабаритных характеристик теплообменной секции. Плоские трубы были получены методом экструзии, а нанесенное на них оребрение – методом деформирующего резания.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились для ряда образцов теплообменной секции АВО, которая представляла собой пакет плоских труб из алюминиевого сплава, полученных методом экструзии. На внешних поверхностях труб механической обработкой была сформирована система ребер (метод деформирующего резания, который комбинирует подрезку и отгибку поверхностных слоев теплообменной поверхности [30, 31]).

Схема и внешний вид исследуемой теплообменной секции показаны на рис. 1. Геометрические параметры секций сведены в табл. 1. В исследовании варьировались высота и шаг ребер, толщина стенок канала в трубе, количество каналов в трубе и высота несущей трубы. Толщина ребер по высоте изменялась в диапазоне от 0,0002 до 0,0350 м (у основания), ширина разрезов ребер для всех труб $S = 0,001$ м, а длина теплообменной секции $L = 1,4$ м.

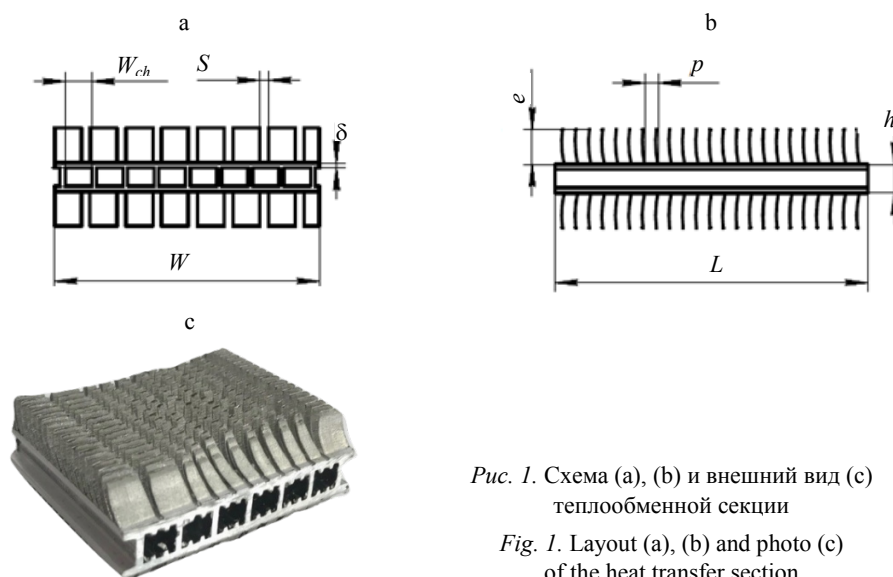


Рис. 1. Схема (а), (б) и внешний вид (с) теплообменной секции

Fig. 1. Layout (a), (b) and photo (c) of the heat transfer section

Таблица 1

Геометрические характеристики образцов теплообменной секции
Geometric characteristics of heat transfer section samples

№ образца	Шаг ребер p , м	Высота ребер e , м	Толщина стенок канала трубы, м	Ширина секции трубы W , м	Высота плоской трубы h , м	Количество внутренних каналов, шт.	Ширина одного внутреннего канала W_{ch} , мм
1	0,00200	0,0085	0,0012	0,0520	0,0080	6	6
2	0,00200	0,0065	0,0012	0,0520	0,0085	6	6
3	0,00250	0,0040	0,0012	0,0520	0,0085	6	6
4	0,00375	0,0055	0,0012	0,0520	0,0085	6	6
5	0,00250	0,0080	0,0012	0,0675	0,0083	8	6
6	0,00250	0,0080	0,0012	0,0675	0,0085	8	6
7	0,00375	0,0060	0,0012	0,0675	0,0092	8	6

Исследования теплогидравлических характеристик образцов теплообменной секции проводились с использованием экспериментального стенда (рис. 2а). На стенде находились: замкнутый масляный контур с последовательно расположенными нагревателем ЭН и масляным насосом Н (ПМФ1-4); ультразвуковой расходомер масла Рм (PortoFlow330); расширительный бак Б. Применялись датчики температуры – термометры сопротивления Pt100 и регистраторы РМТ-59 (Т1 и Т2), установленные до и после рабочего участка; датчики перепада давления на рабочем участке ДД1 (АИР20/М2-ДД). В качестве теплоносителя использовалось турбинное масло ТП-22С (ТУ 38.101821–83).

Образец теплообменной секции помещался в аэродинамическую трубу разомкнутого типа, включающую всасывающий центробежный вентилятор В (ВР132-30-8), датчик скорости воздуха Рв (термоанемометры ТТМ-2-04-01), датчики температуры Т3 и Т4, установленные до и после рабочего участка, датчики перепада давления на рабочем участке ДД2 (ОВЕН ПД200). Регулировка оборотов вентилятора была реализована с использованием устройства частотного регулирования ОВЕН ПЧВ 204-15К-В.

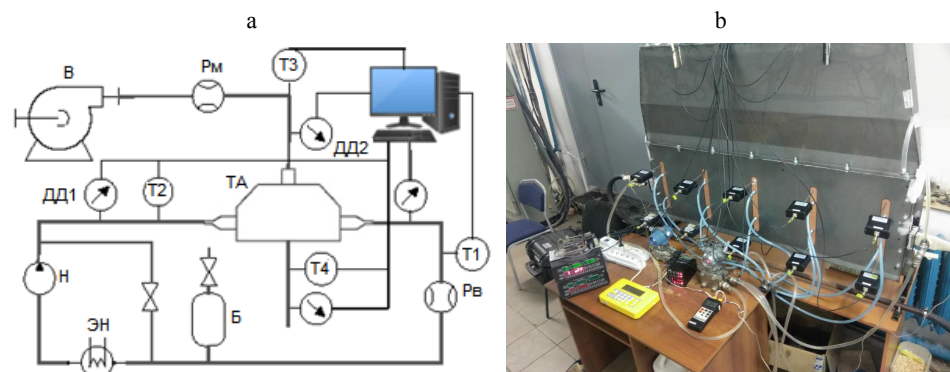


Рис. 2. Схема экспериментального стенда для исследования теплогидравлических характеристик теплообменных секций (а) и внешний вид рабочего участка (б)

Fig. 2. Schematic representation of the test bench for studying thermal-hydraulic parameters of heat transfer sections (a) and appearance of the working section (b)

Рабочий участок аэродинамической трубы (рис. 2b) представляет собой теплоизолированный плоский короб с установленным внутри него образцом теплообменной секции. Конструкция короба дает возможность обеспечить равномерный массовый расход воздуха по всей длине оребренной части образца секции. Оборудование рабочего участка позволяет реализовать перекрестный ток теплоносителей – масла в каналах теплообменной секции и воздуха (при поперечном обтекании вдоль ребер). На рабочем участке было реализовано многоточечное измерение (рис. 2b) температуры потока воздуха, скорости течения и давления до и после образца теплообменной секции.

По результатам измерений определялись средние температуры потока воздуха $\bar{t}_в$ и потока масла $\bar{t}_м$ до и после рабочего участка, по которым вычислялись перепады температур на секции по обоим теплоносителям $\Delta t_в$ и $\Delta t_м$; давление обоих теплоносителей до рабочего участка и перепады давления обоих теплоносителей на рабочем участке $\Delta p_в$, $\Delta p_м$; расходы масла и воздуха $G_в$, $G_м$; тепловая мощность теплообменной секции Q .

Расход воздуха $G_в$, кг/с, находили по осредненной скорости потока воздуха $\bar{v}$ в канале рабочего участка до теплообменной секции по показателям термоанемометров в пяти сечениях по длине теплообменной секции

$$G_в = \rho_в \bar{v} F, \quad (1)$$

где F – площадь поперечного сечения канала рабочего участка (теплоноситель – воздух), м²; $\rho_в$ – плотность воздуха, рассчитывается в сечении измерения скоростей по измеренным в эксперименте средним значениям давления и температуры потока воздуха, кг/м³.

Тепловую мощность секции теплообменного аппарата при заданных геометрических и режимных параметрах находили по зависимости

$$Q = G c_p \Delta t, \quad (2)$$

где c_p – теплоемкость теплоносителя, определяется по средней температуре потока до и после рабочего участка, кДж/(кг·°C); G – расход теплоносителя, кг/с; Δt – температурный напор, °C.

Тепловую мощность находили по параметрам воздушного и масляного теплоносителей. Расхождение вычисленных значений, определяемое тепловыми потерями на рабочем участке, не превышало 5 %. Для дальнейшего сравнения тепловой эффективности, рассчитанной по трактам масла и воздуха, было взято минимальное значение тепловой мощности обоих теплоносителей.

Удельное термическое сопротивление теплопередаче через плоскую стенку теплообменной секции без учета развития поверхности через оребрение вычисляли по формуле

$$R = 1/k,$$

где k – коэффициент теплопередачи,

$$k = Q / (F \overline{\Delta t}), \quad (3)$$

$F = 2(W + h)L$ – площадь теплообмена по внешней поверхности без учета оребрения, м²; $\overline{\Delta t}$ – среднелогарифмический температурный напор в секции теплообменной трубы при поперечном обтекании.

Эффективность теплообменной секции оценивалась на основе: тепловой мощности Q , тепловой эффективности ϵ , удельного термического сопротивления теплопередаче труб R , критериев энергетической эффективности:

М. В. Кирпичева

$$E = \frac{Q}{N}; \quad (4)$$

В. М. Антуфьева

$$E' = \frac{\alpha}{N_0} = \frac{Q}{(\sum N) \Delta \bar{t}} = \frac{\kappa}{N_{air} + N_{oil}}, \quad (5)$$

где $N_0 = N / F$ – удельная мощность на прокачку теплоносителя; N_{air} , N_{oil} – мощность на прокачку воздуха и масла соответственно, вычисляемая по формуле

$$N_i = G_i \Delta p_i / (\rho_i \eta_i); \quad (6)$$

η_i – КПД насоса или вентилятора.

Результаты исследований

Результаты экспериментального исследования для каждого изученного типа теплообменной секции были представлены в виде зависимостей тепловой мощности от режимных параметров (числа Рейнольдса). На рис. 3 приведены результаты для образцов № 2, 5.

Анализ эффективности образцов теплообменной секции в зависимости от геометрических параметров оребрения проводился при фиксированных расходах обоих теплоносителей – масла и воздуха. Расходы оценивались из условий эксплуатации АВО: $G_{oil} = 0,31 \pm 0,10$ кг/с и $G_{air} = 0,36 \pm 0,10$ кг/с. Поскольку геометрические параметры труб варьировались в процессе исследования, это приводило к изменению скоростей теплоносителей (чисел Рейнольдса) и соответственно коэффициентов теплоотдачи и во внутренней части теплообменной секции, и в наружной. Необходимо отметить, что при исследуемых параметрах оребрения теплообменной секции (табл. 1) коэффициенты эффективности оребрения изменяются от 0,83 при высоте ребра 0,0085 м до 0,95 при высоте ребра 0,0040 м.

Результаты по тепловой мощности, тепловой эффективности и общему термическому сопротивлению теплопередаче изучаемой секции оребренной трубы представлены в табл. 2.

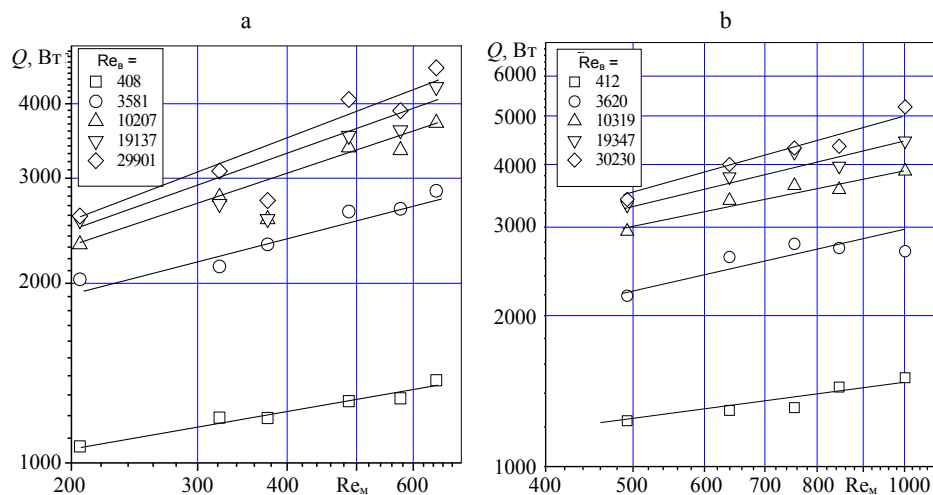


Рис. 3. Тепловая мощность исследованных образцов теплообменной секции в зависимости от режимных параметров для образцов: а – № 5; б – № 2

Fig. 3. Thermal power of test samples of the heat transfer section vs. regimes for sample: a – No 5; b – No 2

Таблица 2

Теплогидравлические характеристики теплообменных секций
Thermal-hydraulic performance of heat transfer sections

№ образца	Тепловая мощность секции оребренной трубы, Вт	Тепловая эффективность секции оребренной трубы	Общее термическое сопротивление теплопередаче, $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$	Удельная масса секции оребренной трубы, кг/м	Коэффициент компактности, $\text{м}^2 / \text{м}^3$
1	4302	0,278	$1,36 \cdot 10^{-3}$	0,802	13156
2	4267	0,272	$1,35 \cdot 10^{-3}$	0,802	11720
3	3821	0,243	$1,33 \cdot 10^{-3}$	0,802	7580
4	2905	0,188	$1,64 \cdot 10^{-3}$	0,802	5888
5	4457	0,312	$1,63 \cdot 10^{-3}$	1,025	7885
6	2738	0,177	$2,04 \cdot 10^{-3}$	1,025	7821
7	3700	0,240	$1,86 \cdot 10^{-3}$	1,025	4566

Результаты по тепловой мощности исследованных образцов теплообменной секции, геометрические параметры которых представлены в табл. 1, показывают, что максимальное значение получено для образца № 5 с максимальной высотой ребер 0,0080 м и минимальным их шагом 0,0025 м в исследованном диапазоне режимных параметров. Данный образец имеет достаточно большую площадь теплообмена из-за своей большой ширины. Однако образец № 1, обладая подобными размерами ребер и несмотря на меньшую по сравнению с образцом № 5 ширину (площадь теплообмена), обеспечивает передачу практически той же тепловой мощности. Это связано с тем, что при фиксированном в экспериментах расходе одного теплоносителя (масла) площадь проходного сечения образца № 1 меньше, чем у образца № 5, и, таким образом, скорость течения масла в образце № 1 выше. В итоге это привело к снижению термического сопротивления теплопередаче из-за роста коэффициента теплоотдачи для образца № 1 по

сравнению с образцом № 5. Итак, теплообменная секция с данными геометрическими параметрами может снизить массогабаритные характеристики блока АВО масла при заданных параметрах функционирования масляного насоса и вентиляторной установки. Полученный результат подтверждается анализом тепловой эффективности образцов (табл. 2).

Дальнейшая оценка эффективных коэффициентов теплопередачи, учитывающая увеличение площади теплопередающей поверхности и эффективность оребрения, показывает, что наименьшее термическое сопротивление имеют образцы № 1–3 (шаг ребер 0,0020–0,0025 м при изменении высоты ребер практически в два раза – от 0,0040 до 0,0085 м), что формирует меньшее проходное сечение каналов по маслу, приводящее, в свою очередь, к повышению скорости течения масла при его фиксированном расходе. Как следствие, наблюдается рост коэффициентов теплоотдачи со стороны масла и коэффициента теплопередачи в целом.

Таким образом, максимальную передаваемую тепловую мощность демонстрирует образец № 5 за счет как достаточно высоких значений коэффициентов теплопередачи, так и значительной площади теплообмена.

Однако при прогнозировании характеристик теплообменных аппаратов важно оценить не только снимаемую ими тепловую мощность, но и затраты энергии на прокачку теплоносителя. Как правило, обеспечение высоких тепловых характеристик может быть достигнуто за счет увеличения потерь давления и, как следствие, повышения энергии, затрачиваемой на прокачку теплоносителя. Результаты сравнения рассмотренных образцов (табл. 1) теплообменной секции по критериям энергетической эффективности М. В. Кирпичева E представлены на рис. 4.

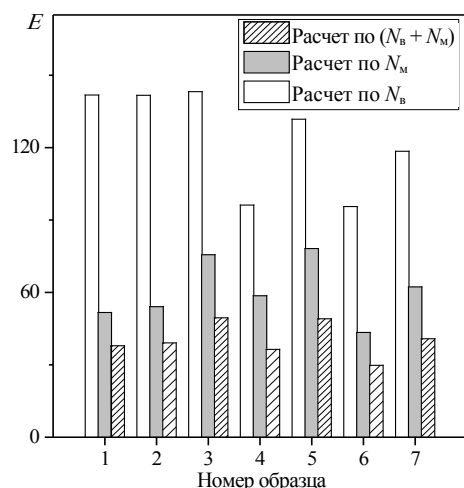


Рис. 4. Критерий энергетической эффективности М. В. Кирпичева E исследованных образцов теплообменной секции

Fig. 4. M. V. Kirpichev's energy performance criterion E of heat transfer section samples under study

Наибольшие значения критерия М. В. Кирпичева соответствуют оптимальным геометрическим размерам теплообменной секции, поскольку обеспечивают передачу тепловой энергии при минимуме энергетических затрат на прокачку теплоносителя. Таким образом, несмотря на высокие потери давления, наилучшие показатели по тепловой эффективности по тракту воздуха (N_{air}) имеют образцы теплообменной секции № 1–3. Однако за счет меньшей площади проходного сечения и соответственно увеличения скорости течения масла в теплообменной секции данные образцы

имеют более низкие показатели критерия эффективности М. В. Кирпичева E по мощности на прокачку теплоносителя по масляному тракту (N_{oil}). Максимальный суммарный критерий эффективности при заданных режимах эксплуатации у образца № 5 ($E = 49,5$).

Анализ полученных результатов по критерию энергетической эффективности В. М. Антуфьева E' подтверждает ранее сделанные выводы о том, что максимальной теплогидравлической эффективностью обладает образец теплообменной секции № 5, для которого $E' = 1,02$. Необходимо отметить, что для других образцов E' изменяется в пределах 0,77–0,92.

Таким образом, при сохранении геометрических размеров АВО масла за счет использования теплообменной секции с повышенной тепловой эффективностью (образец № 5) возможно увеличение количества отводимой теплоты или уменьшение массогабаритных характеристик при сохранении тепловой мощности, что приводит к дополнительному уменьшению затрат энергии на прокачку теплоносителя и к повышению теплогидравлической эффективности аппарата в целом.

Необходимо отметить, что для уменьшения потерь давления со стороны потока воздуха торцы плоских труб следует изготавливать закругленными. В [28] показано, что возрастает теплогидравлическая эффективность такой конструкции оребренных овальных (плоских) труб с ребрами, установленными по широким сторонам трубы, по сравнению с круглыми и овальными трубами с различной компоновкой ребер.

ВЫВОДЫ

1. Представлены экспериментальные результаты апробации пассивного метода воздействия на пристенную область теплопередающей поверхности для повышения энергетической эффективности воздухоохлаждаемых теплообменников. Развитие теплопередающей поверхности производилось за счет формирования оребрения ресурсоэффективным (безотходным) методом деформирующего резания. На основе различных критериев эффективности произведен и обоснован выбор оптимальных геометрических параметров образцов теплообменной секции аппарата воздушного охлаждения, обеспечивающих благодаря своим геометрическим характеристикам теплообменной поверхности (оребрения) при фиксированных энергетических затратах приводной техники аппарата воздушного охлаждения масла наилучшие показатели.

2. Полученные экспериментальные значения тепловых потоков и потерь давления будут использоваться для верификации результатов численного моделирования в широком диапазоне определяющих параметров с целью получения локальных характеристик теплообменной поверхности, а также для проведения работ по оптимизации аппарата воздушного охлаждения масла производства ООО фирма «Термокам» для проектируемых установок компримирования воздуха или газа.

3. Работа выполнена в лаборатории МФТП КНИТУ-КАИ при поддержке РФФИ по проекту 19-58-04006-бел-мол-а, БРФФИ по проектам T19PM-076 и Ф18P-038, а также по договору МФТП-3 с ООО фирма «Термокам».

ЛИТЕРАТУРА

1. Шмеркович, В. М. Применение АВО при проектировании нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов / В. М. Шмеркович. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1971. 112 с.

2. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения / А. Н. Бессонный [и др.]; под ред. А. Н. Бессонного, В. Б. Кунтыша. СПб.: Недра, 1996. 512 с.
3. Сидягин, А. А. Расчет и проектирование аппаратов воздушного охлаждения / А. А. Сидягин, В. М. Косырев. Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т имени Р. Е. Алексеева, 2009. 150 с.
4. Воздушные конденсаторы для паротурбинных установок малой и средней мощности / О. О. Мильман [и др.] // Теплоэнергетика. 1998. № 1. С. 35–39.
5. Королев, И. И. О комбинированных системах охлаждения ТЭЦ / И. И. Королев, Е. В. Геннова, С. Е. Бенклян // Теплоэнергетика. 1996. № 11. С. 49–55.
6. Мильман, О. О. Воздушно-конденсационные установки / О. О. Мильман, В. А. Федоров. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 208 с.
7. Combined Air-Cooled Condenser Layout with in Line Configured Finned Tube Bundles to Improve Cooling Performance / Yanqiang Kong [et al.] // Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 154. P. 505–518.
8. Impacts of Geometric Structures on Thermo-Flow Performances of Plate Fin-Tube Bundles / Y. Q. Kong [et al.] // International Journal of Thermal Sciences. 2016. Vol. 107. P. 161–178.
9. Теплотехника, отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха / В. М. Гусев [и др.]. Л.: Стройиздат, 1981. 343 с.
10. Зорин, В. М. Атомные электростанции / В. М. Зорин. М.: Изд. дом МЭИ, 2012. 672 с.
11. Васильев, В. А. Разработка опытной модульной электростанции для европейской части России / В. А. Васильев, В. В. Ильенко // Теплоэнергетика. 1993. № 4. С. 30–33.
12. Инженерный метод теплового расчета аппарата воздушного охлаждения в режиме свободно-конвективного теплообмена / В. Б. Кунтыш [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2013. № 12. С. 3–6.
13. Попов, И. А. Промышленное применение интенсификации теплообмена – современное состояние проблемы (обзор) / И. А. Попов, Ю. Ф. Гортышов, В. В. Олимпиев // Теплоэнергетика. 2012. № 1. С. 3–14.
14. Калинин, А. Ф. Оценка эффективности работы вентиляторов нового поколения для АВО типа 2АВГ-75 / А. Ф. Калинин, А. В. Фомин // Нефть, газ и бизнес. 2011. № 2. С. 57–60.
15. Васильев, Ю. Н. Повышение эффективности теплообменных аппаратов / Ю. Н. Васильев, А. И. Гриценко, В. И. Нестеров // Нефтяное хозяйство. 1992. № 5. С. 93–95.
16. Основные способы энергетического совершенствования аппаратов воздушного охлаждения / В. Б. Кунтыш [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 1997. № 4. С. 43–44.
17. Шайхутдинов, А. З. Современные АВО-газа – ресурс энергосбережения в газовой отрасли / А. З. Шайхутдинов, В. А. Лифанов, В. А. Маланичев // Газовая промышленность. 2010. № 9. С. 40–41.
18. Аппараты воздушного охлаждения нового поколения. Оптимальное сочетание параметров теплообменного блока и вентиляторной установки. Снижение энергопотребления аппарата и удобство его эксплуатации / П. А. Аксенов [и др.] // Нефтегаз. 2003. № 2. С. 109–111.
19. Физическая модель и общая математическая постановка задачи исследования теплоаэродинамических характеристик аппарата воздушного охлаждения с внешней рециркуляцией воздуха в режимах жалюзийного регулирования / К. М. Давлетов [и др.] // Геология, бурение, разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений: научно-технический сборник. М.: Газпром, 2006. Вып. № 4. С. 53–56.
20. Астафьев, Е. Н. Анализ выбора вариантов комплектации аппаратов воздушного охлаждения дожимных компрессорных станций при разработке месторождений Крайнего Севера / Е. Н. Астафьев, К. М. Давлетов, М. П. Игнатьев // Наука и техника в газовой промышленности. 2006. № 4. С. 42–48.
21. Аксютин, О. Е. Снижение энергозатрат на охлаждение природного газа в АВО КС / О. Е. Аксютин // Газовая промышленность. 2009. № 2. С. 74–76.
22. Аршакян, И. И. Повышение эффективности работы установок охлаждения газа / И. И. Аршакян // Газовая промышленность. 2006. № 12. С. 52–55.
23. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды: ГОСТ 15150–69. М.: Стандартинформ, 2006. 60 с.
24. Кунтыш, В. Б. Анализ тепловой эффективности, объемной и массовой характеристик теплообменных секций аппаратов воздушного охлаждения / В. Б. Кунтыш, А. Э. Пиир // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2009. № 5. С. 3–6.
25. Перспективные методы интенсификации теплообмена для теплоэнергетического оборудования / И. А. Попов [и др.] // Энергетика Татарстана. 2011. № 1. С. 25–29.

26. Олимпиев, В. В. Интенсификация теплообмена и потенциал энергосбережения в охладителях технических масел / В. В. Олимпиев // Теплоэнергетика. 2010. № 8. С. 40.
27. Разработка и опытно-промышленная проверка комплекса мероприятий по повышению эффективности и надежности работы маслоохладителей / Ю. М. Бродов [и др.] // Электрические станции. 1994. № 12. С. 33–36.
28. Экономайзер-утилизатор из плоско-овальных труб с неполным оребрением / Е. Н. Письменный [и др.] // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2010. Т. 3/1, № 45. С. 15–19.
29. Осипов, С. Н. Энергоэффективные малогабаритные теплообменники из пористых теплопроводных материалов / С. Н. Осипов, А. В. Захаренко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 4. С. 346–358. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-346-358>.
30. Зубков, Н. Н. Изготовление теплообменных поверхностей нового класса деформирующим резанием / Н. Н. Зубков, А. И. Овчинников, О. В. Кононов // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. 1993. № 4. С. 79–82.
31. Теплогидравлическая эффективность труб с внутренним спиральным оребрением / А. Н. Скрыпник [и др.] // ИФЖ. 2018. Т. 91, № 1. С. 52–63.

Поступила 26.06.2019 Подписана в печать 24.09.2019 Опубликовано онлайн 31.03.2020

REFERENCES

1. Shmerkovich V. M. (1971) *Air Cooling Apparatuses Implementation in Design of Refineries and Petrochemical Plants*. Moscow, CRIITERpetrochem. 112 (in Russian).
2. Bessonnyi A. N., Dreitsler G. A., Kuntyshev V. B. et al. (1996) *Fundamentals of Calculation and Design of Air Cooling Heat Exchangers*. Saint-Petersburg, Nedra Publ. 512 (in Russian).
3. Sidyagin A. A., Kosyrev V. M. *Calculation and Design of Air Cooling Devices*. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev. 150 (in Russian).
4. Mil'man O. O., Federov V. A., Lavrov V. I., Demochkin V. A., Gerasimov A. V., Serezhkin N. I., Khochkin I. A. (1998) Air Condensers for Steam Turbine Units of Low and Medium Power. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, (1), 35–39 (in Russian).
5. Korolev I. I., Genova E. V., Benklyan S. E. (1996) On Cooling Systems of Combined Heat and Power Plants. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, (11), 49–55 (in Russian).
6. Mil'man O. O., Fedorov V. A. (2002) *Air-Condensing Installations*. Moscow, MEI Publ. 208 (in Russian).
7. Yanqiang Kong, Weijia Wang, Zhitao Zuo, Lijun Yang, Xiaoze Du, Yongping Yang (2019) Combined Air-Cooled Condenser Layout with in Line Configured Finned Tube Bundles to Improve Cooling Performance. *Applied Thermal Engineering*, 154, 505–518. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.099>.
8. Kong Y. Q., Yang L. J., Du X. Z., Yang Y. P. (2016) Impacts of Geometric Structures on Thermo-Flow Performances of Plate Fin-Tube Bundles. *International Journal of Thermal Sciences*, 107, 161–178. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.04.011>.
9. Gusev V. M., Kovalev N. I., Popov V. P., Potroshkov V. A. (1981) *Heat Engineering, Heating, Ventilation and Air Conditioning*. Leningrad, Stroiizdat Publ. 343 (in Russian).
10. Zorin V. M. (2012) *Nuclear Power Plants*. Moscow, MEI Publishing House. 672 (in Russian).
11. Vasil'ev V. A., Il'enko V. V. Development of a Pilot Modular Power Plant for the European Area of Russia. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, (4), 30–33 (in Russian).
12. Kuntyshev V. B., Sukhotskii A. B., Samorodov A. V. (2014) Engineering Method for Thermal Analysis of an Air Cooler in a Regime of Free-Convective Heat Exchange. *Chemical and Petroleum Engineering*, 49 (11–12), 773–779. <https://doi.org/10.1007/s10556-014-9834-9>.
13. Popov I. A., Gortyshev Yu. F., Oлимпиев V. V. (2012) Industrial Application of Heat Transfer Intensification: Current State of the Problem (a Review). *Teploenergetika = Thermal Engineering*, (1), 3–14 (in Russian).
14. Kalinin A. F., Fomin A. V. (2011) Evaluation of the Performance of the Ventilators of New Generation for the “ZAVG-75” Air Cooler. *Neft', Gaz i Biznes* [Oil, Gas and Business], (2), 57–60 (in Russian).
15. Vasil'ev Yu. N., Gritsenko A. I., Nesterov V. I. (1992) Improving the Efficiency of Heat Exchangers. *Neftyanoe Khozyaistvo = Oil Industry*, (5), 93–95 (in Russian).

16. Kunttysh V. B., Bessonnyi A. N., Brill' A. A. (1997) Improving the Energy Efficiency of Air-Cooled Heat Exchangers. *Chemical and Petroleum Engineering*, 33 (4), 402–407. <https://doi.org/10.1007/bf02416728>.
17. Shaikhutdinov A. Z., Lifanov V. A., Malanichev V. A. (2010) Modern Devices of Air Cooling of Gas as a Resource of Energy Saving in Gas Industry. *Gazovaya Promyshlennost' = Gas Industry Magazine*, (9), 40–41 (in Russian).
18. Aksenov P. A., Dashunin N. V., Zabrodin Yu. V., Lifanov V. A., Malanichev V. A., Miatov O. L. (2003) Air Cooling Devices of the New Generation. The Optimal Combination of Parameters of the Heat Exchange Unit and Ventilator Installation. *Neftegaz*, (2), 109–111 (in Russian).
19. Davletov K. M. et al. (2006) Physical Model and General Mathematical Formulation of the Problem of Investigation of Thermal and Aerodynamic Characteristics of the Air Cooling Apparatus with External Air Recirculation in the Modes of Louver Regulation. *Geologiya, Burenie, Razrabotka i Eksploatatsiya Gazovykh i Gazokondensatnykh Mestorozhdenii: Nauchno-Tekhnicheskii Sbornik* [Geology, Drilling, Development and Operation of Gas and Gas Condensate Fields: Scientific and Technical Collection]. Moscow, Gazprom, (4), 53–56 (in Russian).
20. Astaf'ev E. N., Davletov K. M., Ignat'ev M. P. (2006) Analysis of the Choice of Options for the Configuration of Air Cooling Devices of Booster Compressor Stations in the Deposit Development of in the Far North. *Nauka i Tekhnika v Gazovoi Promyshlennosti* [Science and Technology in the Gas Industry], (4), 42–48 (in Russian).
21. Aksyutin O. E. (2009) Reduction of Energy Consumption for Natural Gas Cooling in Air Cooling Devices of the Compressor Station. *Gazovaya Promyshlennost' = Gas Industry Magazine*, (2), 74–76 (in Russian).
22. Arshakyan I. I. (2006) Improving the Efficiency of Gas Cooling Plants. *Gazovaya Promyshlennost' = Gas Industry Magazine*, (12), 52–55 (in Russian).
23. State Standart 15150–69. Machines, Devices and Other Technical Products. Modifications for Different Climatic Regions. Categories, Conditions of Operation, Storage and Transportation in Terms of the Impact of Climatic Factors of the Environment. Moscow, Standartinform, 2006. 60 (in Russian).
24. Kunttysh V. B., Piir A. E. (2009) Analysis of the Thermal Efficiency, Volume, and Weight Characteristics of Heat Exchange Sections of Air Cooling Equipment. *Chemical and Petroleum Engineering*, 45 (5–6), 257–262. <https://doi.org/10.1007/s10556-009-9183-2>.
25. Popov I. A., Yakovlev A., Shchelchikov A., Ryzhkov A. V. (2011) Promising Methods of Heat Exchange Intensification for Heat Power Equipment. *Energetika Tatarstana* [Power Engineering of Tatarstan], 1, 25–29 (in Russian).
26. Olimpiev V. V. (2010) Enhancement of Heat Transfer and the Potential for Energy Conservation in Industrial Oil Coolers. *Thermal Engineering*, 57 (8), 702–713. <https://doi.org/10.1134/s0040601510080148>.
27. Brodov Yu. M., Aronson K. E., Ryabchikov A. Yu., Bukhman G. D. (1994) Development and Pilot Testing of a Set of Measures to Improve the Efficiency and Reliability of Oil Coolers. *Elektricheskie Stantsii = Electrical Stations*, (12), 33–36 (in Russian).
28. Pis'mennyi E. N., Demchenko V. G., Terekh A. M., Semenyako A. V. (2010) Economizer and the Heat Exchanger of the Flat Oval Tubes with Partial Ribbing. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/1 (45), 15–19 (in Russian).
29. Osipov S. N., Zakharenko A. V. (2018) Energy-Efficient Compact Heat Exchangers Made of Porous Heat-Conducting Materials. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (4), 346–358. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-346-358>.
30. Zubkov N. N., Ovchinnikov A. I., Kononov O. V. (1993) Fabrication of Heat Exchange Surfaces of a New Class by Deforming Cutting. *Vestnik MGTU imeni N. E. Baumana. Ser. "Mashinostroenie" = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, (4), 79–82 (in Russian).
31. Skrypnik A. N., Shchelchikov A. V., Popov I. A., Ryzhkov D. V., Sverchkov S. A., Zhukova Yu. V., Chornyi A. D., Zubkov N. N. (2018) Thermohydraulic Efficiency of Pipes with Internal Spiral Fins. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 91 (1), 52–63. <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1718-y>.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-151-162>

УДК 621.039

Исследование локальной гидродинамики теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР

С. М. Дмитриев¹⁾, А. В. Герасимов¹⁾, А. А. Добров¹⁾, Д. В. Доронков¹⁾,
А. Н. Пронин¹⁾, А. В. Рязанов¹⁾, Д. Н. Солнцев¹⁾, А. Е. Хробостов¹⁾

¹⁾Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева
(Нижний Новгород, Российская Федерация)

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

Реферат. В статье представлены результаты экспериментальных исследований локальной гидродинамики потока теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР, состоящей из ТВСА-Т и ТВСА-Т.mod.2. Моделирование процессов течения потока теплоносителя в пучке твэлов проводилось на аэродинамическом стенде. Исследования осуществлялись на модели фрагмента смешанной активной зоны реактора ВВЭР, состоящей из одного сегмента ТВСА-Т и двух ТВСА-Т.mod.2. Поля давлений потока измеряли пятиканальным пневмометрическим зондом. Поле давлений потока согласно зависимостям, полученным при тарировке, пересчитывалось в направление и величину вектора скорости теплоносителя. Для создания детальной картины течения потока была выделена характерная область поперечного сечения модели, включающая межкассетное пространство и четыре ряда твэлов каждой из топливных сборок ТВСА. В рамках реализации данного исследования проведен анализ пространственного распределения проекций скорости потока теплоносителя, который позволил выявить закономерности обтекания теплоносителем дистанционирующих, перемешивающих и комбинированных дистанционирующих решеток ТВСА, определены величины поперечных потоков теплоносителя, вызванных обтеканием гидравлически неидентичных решеток, установлена их локализация в продольном и поперечном сечениях экспериментальной модели. Кроме того, выявлен эффект накопления гидродинамических возмущений потока в продольном и поперечном сечениях модели, вызванный шахматным расположением гидравлически неидентичных решеток. Результаты исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА-Т и ТВСА-Т.mod.2 приняты для практического использования в АО «ОКБМ Африкантов» при оценке теплотехнической надежности активных зон реакторов ВВЭР и включены в базу данных для верификации программ вычислительной гидродинамики (CFD-кодов) и детального поэлементного расчета активной зоны реакторов.

Ключевые слова: активная зона, тепловыделяющая сборка, дистанционирующие и комбинированные дистанционирующие решетки, гидродинамика теплоносителя, межкассетное взаимодействие

Для цитирования: Исследование локальной гидродинамики теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР / С. М. Дмитриев [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 2. С. 151–162. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-151-162>

Адрес для переписки

Дмитриев Сергей Михайлович
Нижегородский государственный
технический университет имени Р. Е. Алексеева
ул. Минина, 24,
603950, г. Нижний Новгород,
Российская Федерация
Тел.: +7 831 436-23-25
dmitriev@nntu.ru

Address for correspondence

Dmitriev Sergei M.
Nizhny Novgorod State
Technical University named after R. E. Alekseev
24, Minina str.,
603950, Nizhny Novgorod,
Russian Federation
Tel.: +7 831 436-23-25
dmitriev@nntu.ru

Investigation of Coolant Local Hydrodynamics in the Mixed Core of the VVER Reactor

S. M. Dmitriev¹⁾, A. V. Gerasimov¹⁾, A. A. Dobrov¹⁾, D. V. Doronkov¹⁾,
A. N. Pronin¹⁾, A. V. Ryazanov¹⁾, D. N. Solntsev¹⁾, A. E. Khrobostov¹⁾

¹⁾Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev (Nizhny Novgorod, Russian Federation)

Abstract. The article presents the results of experimental studies of the local hydrodynamics of the coolant flow in the mixed core of the VVER reactor, consisting of the TVSA-T and TVSA-T mod.2 fuel assemblies. Modeling of the flow of the coolant flow in the fuel rod bundle was carried out on an aerodynamic test stand. The research was carried out on a model of a fragment of a mixed core of a VVER reactor consisting of one TVSA-T segment and two segments of the TVSA-T.mod2. The flow pressure fields were measured with a five-channel pneumometric probe. The flow pressure field was converted to the direction and value of the coolant velocity vector according to the dependencies obtained during calibration. To obtain a detailed data of the flow, a characteristic cross-section area of the model was selected, including the space cross flow between fuel assemblies and four rows of fuel rods of each of the TVSA fuel assemblies. In the framework of this study the analysis of the spatial distribution of the projections of the velocity of the coolant flow was fulfilled that has made it possible to pinpoint regularities that are intrinsic to the coolant flowing around spacing, mixing and combined spacing grates of the TVSA. Also, the values of the transverse flow of the coolant caused by the flow along hydraulically non-identical grates were determined and their localization in the longitudinal and cross sections of the experimental model was revealed. Besides, the effect of accumulation of hydrodynamic flow disturbances in the longitudinal and cross sections of the model caused by the staggered arrangement of hydraulically non-identical grates was determined. The results of the study of the coolant cross flow between fuel assemblies interaction, i.e. between the adjacent TVSA-T and TVSA-T mod.2 fuel assemblies were adopted for practical use in the JSC of “Afrikantov OKB Mechanical Engineering” for assessing the heat engineering reliability of VVER reactor cores; also, they were included in the database for verification of computational hydrodynamics programs (CFD codes) and for detailed cell-based calculation of the reactor core.

Keywords: core, fuel assembly, spacing and combined spacing grates, coolant hydrodynamics, coolant cross flow between fuel assemblies' interaction

For citation: Dmitriev S. M., Gerasimov A. V., Dobrov A. A., Doronkov D. V., Pronin A. N., Ryazanov A. V., Solntsev D. N., Khrobostov A. E. (2020) Investigation of Coolant Local Hydrodynamics in the Mixed Core of the VVER Reactor. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (2), 151–162. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-151-162> (in Russian)

Введение

В настоящее время проведена частичная перегрузка активной зоны реактора ВВЭР второго энергоблока АЭС «Темелин», в рамках которой загружены тепловыделяющие сборки новой модификации ТВСА-Т.mod.2, пришедшие на замену штатным ТВСА-Т [1]. Разработку конструкции обеих топливныхборок производило АО «ОКБМ Африкантов» (г. Нижний Новгород, Россия).

По сравнению с тепловыделяющими сборками ТВСА-Т, основным отличием конструкции усовершенствованной ТВСА является применение отдельно стоящих перемешивающих решеток (ПР), которые обеспечивают более интенсивное перемешивание теплоносителя в поперечном сечении сборки и повышение критических тепловых потоков, что позволило улучшить эксплуатационные характеристики новой кассеты.

Поскольку оба типа ТВСА – бесчехловые, перемешивание теплоносителя происходит не только в пределах одной кассеты, но и между соседними сборками. Данное явление необходимо учитывать в процессе обоснования теплотехнической надежности активной зоны [2]. Это обусловило необходимость проведения комплексных исследований процесса межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА различных конструкций в смешанной активной зоне реактора ВВЭР.

Экспериментальный стенд

Моделирование течения теплоносителя в активной зоне производилось на аэродинамическом стенде в лаборатории «Реакторная гидродинамика» НГТУ имени Р. Е. Алексеева [3–6].

Для проведения исследований были изготовлены экспериментальные модели (ЭМ), геометрически соответствующие конструкции различных высотных участков твэльного пучка активной зоны реактора ВВЭР. Все компоненты ЭМ пропорционально увеличены на коэффициент геометрического подобия $K_r = 4,4$.

Экспериментальные модели включали в себя сегменты сборок ТВСА-T.mod.2, ТВСА-T и межкассетное пространство (рис. 1a). Пояс дистанционирующей решетки (ДР), представленный на рис. 1b, состоит из пружинистых элементов, расположенных по треугольной решетке и объединенных стальным ободом [7]. Комбинированная дистанционирующая решетка (КДР) ТВСА-T (рис. 1c) снабжена турбулизирующими дефлекторами, размещенными согласно схеме «закрутка вокруг твэла», угол отгиба дефлекторов составляет 38° . Пояс перемешивающей решетки (рис. 1d) снабжен турбулизирующими дефлекторами с углом отгиба 30° , размещенными согласно схеме «порядная прогонка». Все пояса решеток снабжены имитаторами зубчатого края обода.

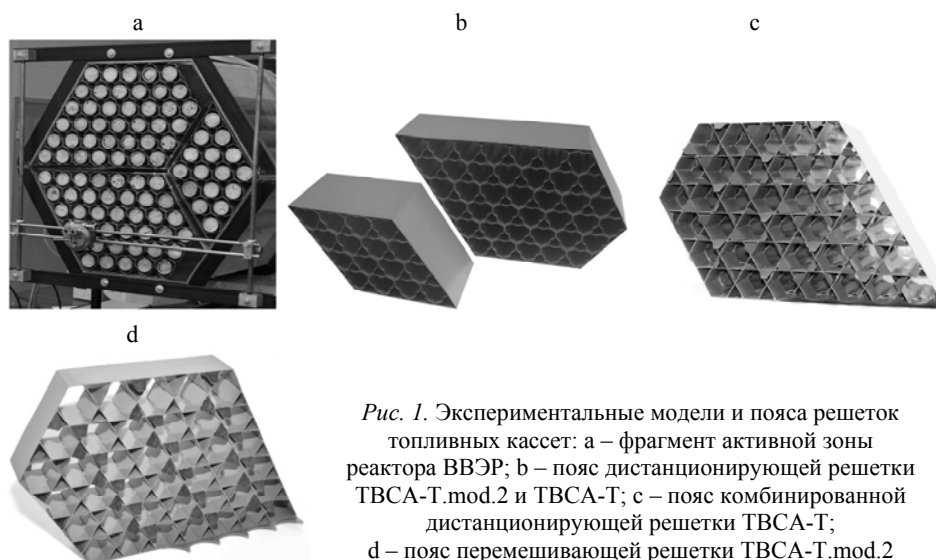


Рис. 1. Экспериментальные модели и пояса решеток топливных кассет: а – фрагмент активной зоны реактора ВВЭР; б – пояс дистанционирующей решетки ТВСА-T.mod.2 и ТВСА-T; в – пояс комбинированной дистанционирующей решетки ТВСА-T; г – пояс перемешивающей решетки ТВСА-T.mod.2

Fig. 1. Test models and spacing grids of fuel assemblies: а – fragment of the VVER core; б – spacing grate of the TVSA-T.mod2 and TVSA-T; в – spacing mixing grate of the TVSA-T; г – mixing grate of the TVSA-T.mod2

Измерительный комплекс

Измерение поля давлений потока теплоносителя производилось пневмометрическим зондом. Датчик выполнен в виде пяти стальных капилляров, расположенных в двух перпендикулярных друг к другу диаметральных плоскостях. Поле давлений потока в окрестности чувствительной части зонда согласно зависимостям, полученным при тарировке, пересчитывалось в направление и величину вектора скорости теплоносителя в месте его позиционирования [8]. Зонд выполнен таким образом, чтобы не вносить возмущения в поток и не искажать направление течения теплоносителя. Погрешность определения составляющих вектора скорости не превышала 7 %. Снятие показаний с зонда осуществлялось преобразователем давления САПФИР-22Р. Данный прибор имеет допустимый предел основной погрешности $\pm 0,25$ %.

Методика проведения исследований

Процесс межкассетного взаимодействия теплоносителя изучали на трех фрагментах твэльного пучка смешанной активной зоны (рис. 2).

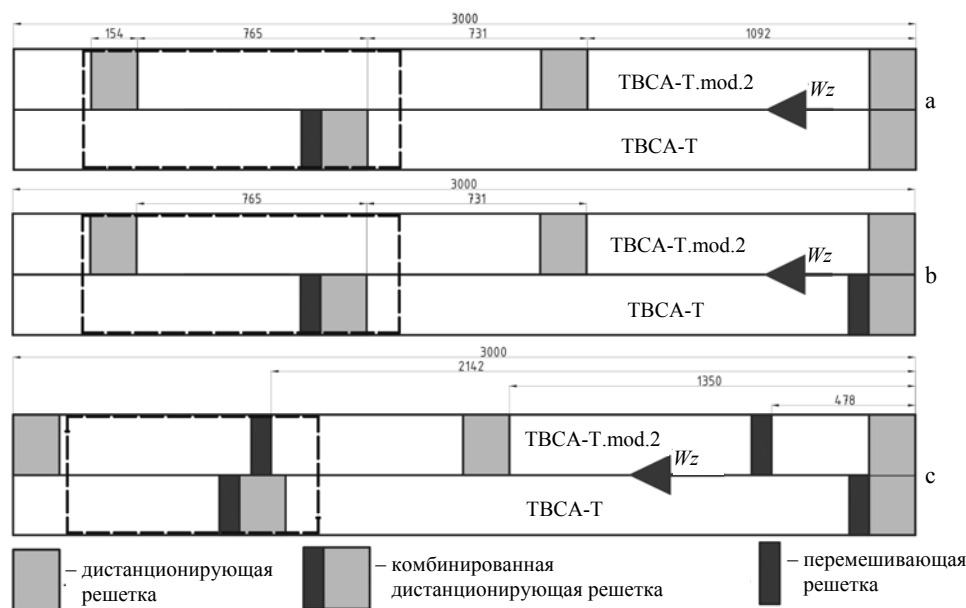


Рис. 2. Схема расположения решеток в различных фрагментах твэльного пучка ТВСА:
а, б, в – нижний, средний и верхний фрагменты соответственно

Fig. 2. The arrangement of grates in various parts of the fuel rod bundle of the TVSA:
a, b, c – bottom, middle and upper parts, respectively

Характерной особенностью ЭМ нижнего фрагмента твэльного пучка является симметричность входных условий течения потока, т. е. на входе в ЭМ установлены ячейковые ДР единой конструкции для обеих ТВСА (рис. 2а). Особенность ЭМ среднего фрагмента твэльного пучка – несимметричность входных условий течения потока, т. е. на входе в ЭМ установлены ячейковая ДР и КДР (рис. 2б). Для ЭМ верхнего фрагмента твэльного пучка,

помимо несимметричности входных условий течения потока, характерно наличие отдельно стоящих ПР (рис. 2с).

Методика проведения исследований заключалась в следующем.

1. Для изучения процесса межкассетного взаимодействия потока были выбраны характерные области в поперечном сечении ЭМ, представленном на рис. 3.

2. Далее характерные области разбивались на определенное количество зон измерения, в каждой из которых с помощью пневмометрического зонда проводились замеры поля давлений потока в характерных сечениях по длине ЭМ (рис. 2). Полученное распределение давлений затем пересчитывалось в проекции скорости на координатные оси X , Y , Z и осреднялось по зазорам между твэлами и межкассетному пространству (рис. 3).

3. По полученным данным строились графики распределения составляющих вектора скорости от относительной координаты l/d_r (где l – расстояния за решетками, в которых проводились замеры поля давлений потока; d_r – гидравлический диаметр модели) и картограммы распределения осевой скорости в поперечном сечении ЭМ.

Обоснование представительности проведения экспериментального изучения течения потока теплоносителя за решетками-интенсификаторами на исследовательском стенде представлено в [9, 10].

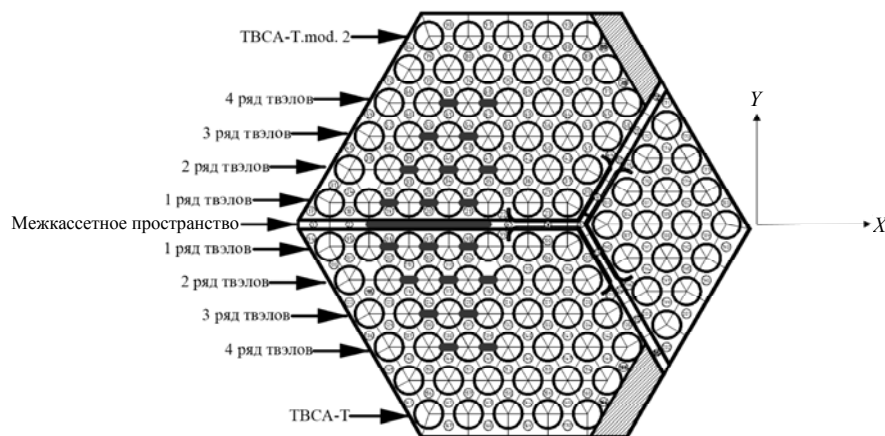


Рис. 3. Схема расположения характерных зазоров в поперечном сечении экспериментальной модели

Fig. 3. The arrangement of the characteristic gaps of the test model cross section

Результаты исследований межкассетного взаимодействия потока теплоносителя

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил выявить общие закономерности течения потока и заключить следующее.

1. В процессе обтекания теплоносителем гидравлически неидентичных, расположенных на разных уровнях дистанционирующих, комбинированных дистанционирующих и перемешивающих решеток (рис. 2) в смежных ТВСА различных конструкций возникают поперечные потоки высокой интенсивности, оказывающие значительное влияние на течение теплоносителя.

ля в соседних топливных кассетах. Движение теплоносителя на исследуемых участках носит следующий характер: при обтекании потоком КДР, расположенной в ТВСА-Т, поперечный поток движется в ТВСА-Т.mod.2, а перед ДР и ПР, расположенными в ТВСА-Т.mod.2, поперечный поток направлен в ТВСА-Т.

2. В области межкассетного пространства отмечено, что величина поперечной скорости при обтекании потоком КДР и ДР на каждом из фрагментов твэльного пучка имеет близкие значения и составляет: $W_y/\bar{W}=0,3$ – для среднего фрагмента; $W_y/\bar{W}=0,25$ – для нижнего; $W_y/\bar{W}=0,2$ – для верхнего фрагмента (рис. 4). Данные величины поперечной скорости потока примерно в два раза меньше, чем в твэльном пучке смежных ТВСА, что обусловлено наличием в межкассетном зазоре потока теплоносителя с высокими аксиальными скоростями, который оказывает демпфирующее воздействие на поперечный поток теплоносителя между соседними ТВСА, заключающееся в уносе части поперечного потока массы в продольном направлении.

3. При обтекании теплоносителем ПР, расположенной в верхнем фрагменте твэльного пучка в ТВСА-Т.mod.2, в межкассетном пространстве образуется поперечный поток, направленный в ТВСА-Т, значение поперечной скорости составляет $W_y/\bar{W}=0,25$ (рис. 4). Данное явление характерно только для области межкассетного пространства и не наблюдается в твэльном пучке кассет, поскольку ПР находится на одном уровне с КДР, обод которой блокирует поперечный поток.

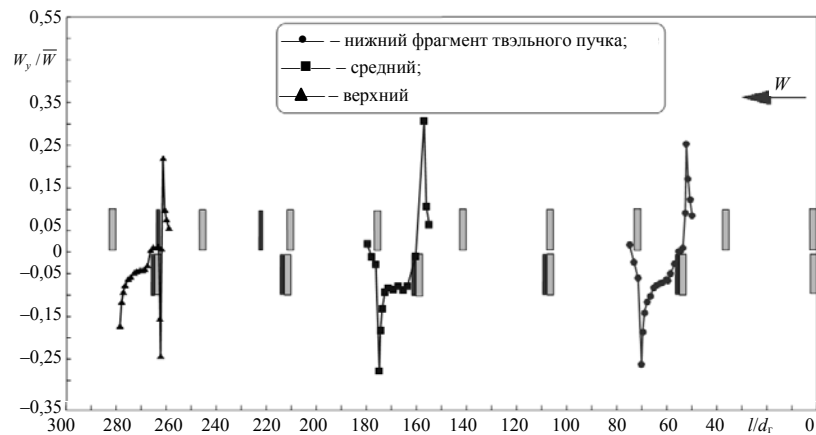


Рис. 4. Распределение поперечной скорости в межкассетном пространстве:

$$\bar{W} = 27,5 \text{ м/с}; \text{ Re} = 78000$$

Fig. 4. The distribution of the flow velocity in cross flow between fuel assemblies

$$\bar{W} = 27.5 \text{ m/s}; \text{ Re} = 78000$$

4. В ряду твэлов, прилегающем к межкассетному пространству, отмечено:

а) при обтекании потоком КДР и ДР, расположенных в нижнем фрагменте твэльного пучка, значения поперечной скорости одинаковы и составляют $W_y/\bar{W}=0,4$ (рис. 5);

б) наибольшая интенсивность поперечного потока теплоносителя наблюдается при обтекании потоком КДР, расположенной в среднем фрагменте твэльного пучка, значение поперечной скорости $W_y/\bar{W} = 0,5$, а при обтекании теплоносителем ДР, расположенной на том же фрагменте, поперечная скорость имеет близкое значение $W_y/\bar{W} = 0,45$ (рис. 5);

в) в верхнем фрагменте твэльного пучка при обтекании потоком КДР и ДР значения поперечной скорости составляют: $W_y/\bar{W} = 0,47$ и $W_y/\bar{W} = 0,40$ соответственно (рис. 5). Данные величины поперечных скоростей близки к результатам, полученным на среднем фрагменте твэльного пучка, что может быть обусловлено наличием перемешивающих решеток;

г) при движении теплоносителя через нижний и средний фрагменты твэльного пучка отмечен процесс накопления гидродинамических возмущений потока, который выражается ростом величины поперечной скорости, а именно – при обтекании потоком КДР и ДР среднего фрагмента твэльного пучка значения поперечной скорости $W_y/\bar{W}$ соответственно на 20 и 10 % больше, чем при обтекании потоком решеток тех же конструкций на нижнем фрагменте (рис. 5). В свою очередь, в верхнем фрагменте твэльного пучка эффект накопления гидродинамических возмущений потока не наблюдается, величина поперечной скорости $W_y/\bar{W}$ близка к значениям скорости на среднем фрагменте, что может быть обусловлено наличием перемешивающих решеток (рис. 5).

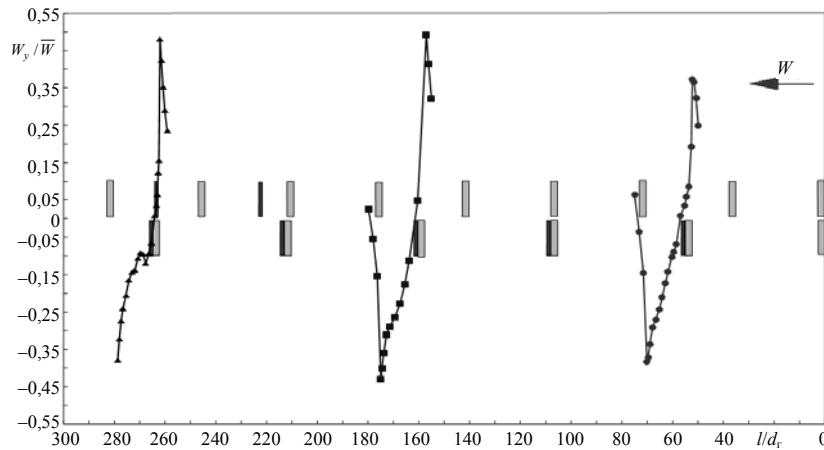


Рис. 5. Распределение поперечной скорости в рядах твэлов ТВСА, прилегающих к межкассетному пространству: $\bar{W} = 27,5$ м/с; $Re = 78000$;
—●— — нижний; —■— — средний; —▲— — верхний фрагменты твэльного пучка

Fig. 5. The distribution of the cross flow velocity in the fuel rod bundles of the TVSA adjusting to the space between fuel assemblies: $\bar{W} = 27,5$ m/s; $Re = 78000$;
—●— — bottom; —■— — middle; —▲— — upper fragments of the fuel rod bundle

5. Анализ распространения гидродинамических возмущений теплоносителя в поперечном сечении топливных сборок показал следующее:

а) начиная со второго ряда твэлов величина поперечной скорости $W_y / \bar{W}$ при обтекании решеток различных конструкций для всех исследуемых фрагментов уменьшается в два раза (рис. 6);

б) закономерности накопления возмущений потока теплоносителя по длине исследуемых фрагментов твэльного пучка, характерные для ряда твэлов, прилегающего к межкассетному пространству, распространяются и на последующие ряды твэлов;

в) распространение гидродинамических возмущений потока в поперечном сечении сборок изменяется в зависимости от исследуемого фрагмента твэльного пучка, а именно: в нижнем фрагменте распространение возмущений потока ограничивается третьим рядом твэлов, в среднем – четвертым, в верхнем – пятым рядами;

г) начиная с шестого ряда твэлов на всех исследуемых участках твэльного пучка наблюдается турбулентное движение теплоносителя, поперечная скорость имеет значение $W_y / \bar{W} \approx 0,05$.

Таким образом, процесс накопления гидродинамических возмущений потока теплоносителя происходит как по длине твэльного пучка исследуемого фрагмента активной зоны, так и в поперечном сечении топливных кассет ТВСА.

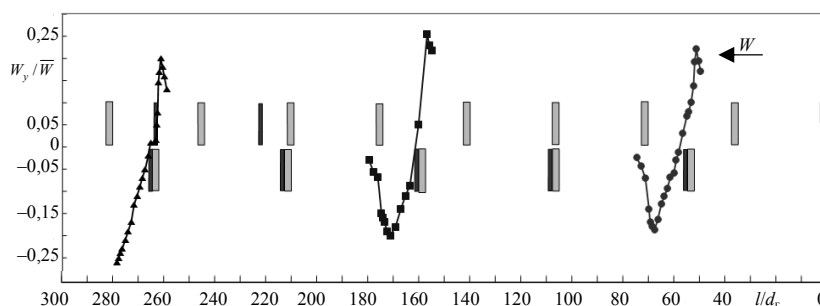


Рис. 6. Распределение поперечной скорости во вторых рядах твэлов ТВСА:

$$\bar{W} = 27,5 \text{ м/с}; \text{ Re} = 78000;$$

—●— — нижний; —■— — средний; —▲— — верхний фрагменты твэльного пучка

Fig. 6. The distribution of the cross flow velocity in the second fuel rod bundles of the TVSA:

$$\bar{W} = 27.5 \text{ m/s}; \text{ Re} = 78000;$$

—●— — bottom; —■— — middle; —▲— — upper fragments of the fuel rod bundle

6. На нижнем и среднем фрагментах твэльного пучка в области поясов исследуемых решеток наблюдается интенсивное перераспределение осевого потока в рядах твэлов, расположенных около межкассетного пространства. Данное перераспределение потока характеризуется локальным ростом величины осевой скорости теплоносителя в одном из сегментов кассет ТВСА, в сторону которого направлен поперечный поток, формиру-

ющийся в процессе обтекания решеток с различным гидравлическим сопротивлением (рис. 7 а, б). Величина осевой скорости в этих областях находится в диапазоне $W_z/\bar{W} \approx 1,3-1,5$. Наименьшее значение осевой скорости $W_z/\bar{W} \approx 0,6-0,9$ на всех исследуемых участках отмечено непосредственно за поясами КДР.

7. Распределение локальных максимумов осевой скорости в поперечном сечении исследуемых ТВСА совпадает с глубиной распространения гидродинамических возмущений потока теплоносителя, т. е. на нижнем фрагменте твэльного пучка локальный максимум осевой скорости потока распространяется на три ряда твэлов, а на среднем фрагменте – на четыре ряда (рис. 7 а, б).

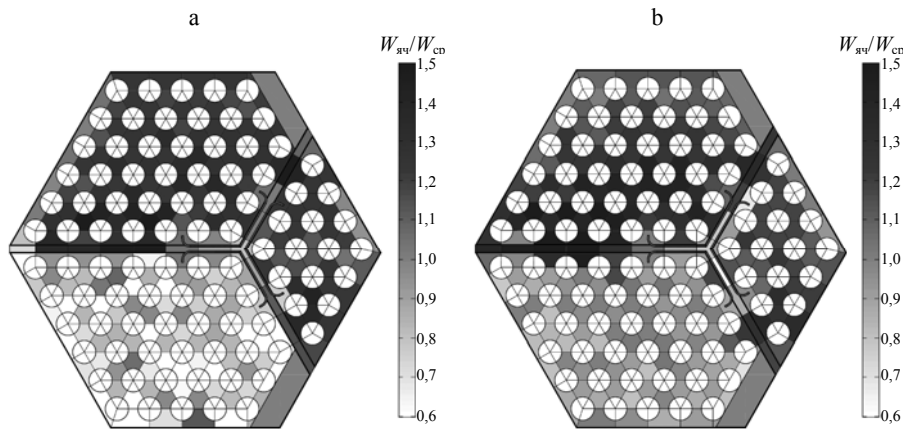


Рис. 7. Картограмма распределения осевой скорости по ячейкам экспериментальной модели: а, б – непосредственно за комбинированной дистанционирующей решеткой на нижнем и среднем фрагментах твэльного пучка соответственно; $\bar{W} = 27,5$ м/с; $Re = 78000$

Fig. 7. The cartogram of the axial speed distribution in the cells of the test model: а, b – immediately behind the combined spacing grate on the bottom and on the middle fragments of the fuel rod bundle, respectively; $\bar{W} = 27.5$ m/s; $Re = 78000$

8. Вследствие наличия гидравлически неидентичных решеток распределение расхода теплоносителя между соседними топливными кассетами приобретает сильную неравномерность. Максимальное различие осевого расхода теплоносителя между смежными кассетами (38 %) наблюдается на среднем фрагменте твэльного пучка и обусловлено наибольшей интенсивностью поперечного потока в данной области. Выравнивание расхода теплоносителя между смежными топливными кассетами отмечено непосредственно перед ДР. Различие расхода теплоносителя между кассетами составляет не более 10 %. Схожая картина распределения осевого расхода потока теплоносителя выявлена и на нижнем фрагменте твэльного пучка (рис. 8).

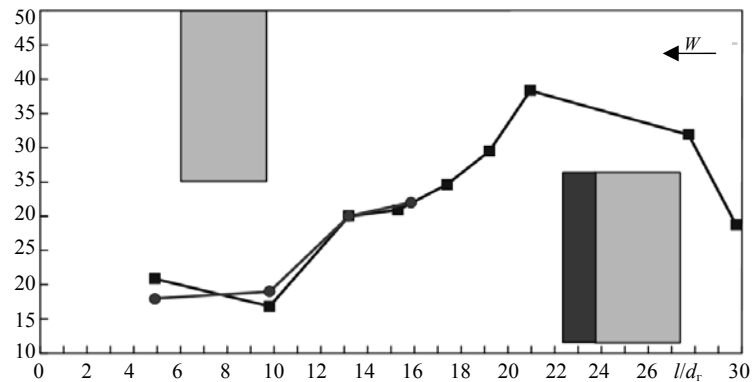


Рис. 8. Соотношение расходов теплоносителя между ТВСА-Т и ТВСА-Т.mod.2:

$$\bar{W} = 27,5 \text{ м/с}; \text{ Re} = 78000;$$

—■— — средний; —●— — нижний фрагменты твэльного пучка

Fig. 8. The ratio of the coolant flow rate between TVSA-T and TVSA-T.mod.2:

$$\bar{W} = 27.5 \text{ m/s}; \text{ Re} = 78000;$$

—■— — middle; —●— — bottom fragments of the fuel rod bundle

ВЫВОДЫ

1. На движение теплоносителя в твэльном пучке смешанной активной зоны реактора ВВЭР значительное влияние оказывают поперечные потоки, сформированные при обтекании гидравлически неидентичных решеток.

2. В области межкассетного пространства величина поперечной скорости при обтекании потоком комбинированной дистанционирующей и дистанционирующей решеток на всех исследуемых фрагментах твэльного пучка кассет имеет близкие значения и составляет: $W_y / \bar{W} = 0,3$ – для среднего фрагмента; $W_y / \bar{W} = 0,25$ – для нижнего; $W_y / \bar{W} = 0,2$ – для верхнего фрагмента.

3. Максимальная величина поперечной скорости отмечена при обтекании потоком комбинированной дистанционирующей решетки, расположенной в среднем фрагменте твэльного пучка, значение поперечной скорости $W_y / \bar{W} = 0,5$.

4. При движении теплоносителя через нижний и средний фрагменты твэльного пучка наблюдается процесс накопления возмущений потока, который выражается ростом величины поперечной скорости, а именно: при обтекании потоком комбинированной дистанционирующей и дистанционирующей решеток среднего фрагмента твэльного пучка значения поперечной скорости $W_y / \bar{W}$ соответственно на 20 и 10 % больше, чем при обтекании потоком решеток тех же конструкций на нижнем фрагменте. В свою очередь, в верхнем фрагменте твэльного пучка эффект накопления возмущений потока отсутствует.

5. Распространение возмущений потока в поперечном сечении сборок изменяется в зависимости от исследуемого фрагмента твэльного пучка, а именно: в нижнем фрагменте твэльного пучка распространение возмущений потока ограничивается третьим рядом твэлов, в среднем – четвертым, в верхнем – пятым рядами твэлов.

6. Процесс накопления гидродинамических возмущений потока теплоносителя наблюдается как по длине твэльного пучка исследуемого фрагмента активной зоны, так и в поперечном сечении топливных кассет.

7. Распределение локальных максимумов осевой скорости в поперечном сечении исследуемых ТВСА совпадает с глубиной распространения гидродинамических возмущений потока теплоносителя.

8. Максимальное различие осевого расхода теплоносителя между смежными кассетами составляет 38 %, наблюдается на среднем фрагменте твэльного пучка и обусловлено наибольшей интенсивностью поперечного потока в данной области.

Работа выполнена в рамках базовой части Государственного задания № 13.8823.2017/8.9 и при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации в рамках научного проекта МК-2398.2018.8.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев, С. М. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах / С. М. Дмитриев [и др.]. М.: Машиностроение, 2013. 415 с.
2. К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов / А. А. Баринов [и др.] // Атомная энергия. 2016. Т. 120, вып. 5. С. 270–275.
3. Экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в тепловыделяющих сборках реакторных установок с водой под давлением / С. М. Дмитриев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 6. С. 591–603. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-6-591-603>.
4. Закономерности формирования потока теплоносителя за перемешивающей дистанционирующей решеткой ТВС-Квадрат реактора PWR / С. М. Дмитриев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 3. С. 258–268. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-258-268>.
5. Изучение гидродинамических процессов течения теплоносителя в ТВС-Квадрат реактора PWR с различными перемешивающими дистанционирующими решетками / С. М. Дмитриев [и др.] // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 5. С. 695–703.
6. Экспериментальные исследования гидродинамики потока теплоносителя за дистанционирующей и перемешивающей решетками ТВСА-12PLUS реактора ВВЭР-1000 / С. М. Дмитриев [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2017. № 1. С. 126–134.
7. Экспериментальные исследования локальной гидродинамики потока теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР с ТВСА-12PLUS / С. М. Дмитриев [и др.] // Вестник Московского энергетического института. 2016. № 2. С. 15–21.
8. Применение многоканального пневмометрического зонда для исследования профиля скорости теплоносителя в моделях топливных кассет ядерных реакторов / С. М. Дмитриев [и др.] // Приборы и методы измерений. 2015. Т. 6, вып. 2. С. 188–195.

9. Гухман, А. А. Введение в теорию подобия / А. А. Гухман. М.: Высш. шк., 1973. 296 с.
10. Гидродинамические особенности течения теплоносителя за перемешивающей дистанционирующей решеткой ТВС-Квадрат реактора PWR / О. Б. Самойлов [и др.] // Теплоэнергетика. 2019. № 4. С. 32–38.

Поступила 20.09.2019 Подписана в печать 16.12.2019 Опубликована онлайн 31.03.2020

REFERENCES

1. Dmitriev S. M., Zverev D. L., Bykh O. A., Panov Yu. K., Sorokin N. M., Farafonov V. A. (2013) *Main Equipment of Nuclear Power Plants with Thermal Neutron Hull Reactors*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 415 (in Russian).
2. Barinov A. A., Dmitriev S. M., Khrobostov A. E., Samoilov O. B. (2016) Methods of Thermo-mechanical Reliability Validation of Thermal Water-Moderated and Water-Cooled Reactor Cores. *Atomic Energy*, 120 (5), 335–341. <https://doi.org/10.1007/s10512-016-0140-9>.
3. Dmitriev S. M., Barinov A. A., Pronin A. N., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2016) Experimental Study of Local Hydrodynamics and Mass Exchange Processes of Coolant in Fuel Assemblies of Pressurized Water Reactors. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (6), 591–603 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-6-591-603>.
4. Dmitriev S. M., Doronkov D. V., Legchanov M. A., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2018) Regularities of Formation of Flow of Coolant Behind the Tvs-Kvadrat Mixing Spacing Grid of the Pwr-Type Reactor. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 258–268 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-61-3-258-268>.
5. Dmitriev S. M., Dobrov A. A., Doronkov D. V., Pronin A. N., Solntsev D. N., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2018) The Study of Hydrodynamic Processes of a Coolant Flow in FA-KVADRAT PWR with Various Mixing Spacer Grids. *Thermophysics and Aeromechanics*, 25 (5), 695–703. <https://doi.org/10.1134/s0869864318050062>.
6. Dmitriev S. M., Varentsov A. V., Doronkov D. V., Pronin A. N., Solntsev D. N., Khrobostov A. E., Sukharev Yu. P. (2017) Experimental Studies of the Fluid Dynamics of the Coolant Flow Behind the TVSA-12PLUS Spacing and Mixing Grids of the VVER-1000 Reactor. *Voprosy Atomnoi Nauki i Tekhniki. Seriya: Fizika Yadernykh Reaktorov* [Issues of Nuclear Science and Technology. Series: Physics of Nuclear Reactors], (1), 126–134 (in Russian).
7. Dmitriev S. M., Doronkov D. V., Legchanov M. A., Pronin A. N., Khrobostov A. E. (2016) Experimental Studies of Local Hydrodynamics of the Coolant Flow in the Core of the VVER Reactor with TVSA-12PLUS. *Vestnik MEI. Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*, (2), 15–21 (in Russian).
8. Dmitriev S. M., Dobrov A. A., Legchanov M. A., Khrobostov A. E. (2015) Application of Multihole Pressure Probe for Research of Coolant Velocity Profile in Nuclear Reactor Fuel Assemblies. *Pribory i Metody Izmerenii = Devices and Methods of Measurements*, 6 (2), 188–195 (in Russian).
9. Gukhman A. A. (1973) *Introduction to the Theory of Similarity*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 296 (in Russian).
10. Samoilov O. B., Noskov A. S., Shipov D. L., Dmitriev S. M., Dobrov A. A., Doronkov D. V., Legchanov M. A., Pronin A. N., Solntsev D. N., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2019) Hydrodynamic Features of the Flow Downstream from the Mixing Spacer Grid in a Kvadrat Fuel Assembly in PWRs. *Thermal Engineering*, 66 (4), 243–248. <https://doi.org/10.1134/s0040601519040074>.

Received: 20 September 2019 Accepted: 16 December 2019 Published online: 31 March 2020

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-163-173>

УДК 621.019

Достоверность линейной взаимосвязи технико-экономических показателей энергоблоков 300 МВт тепловых электростанций

Э. М. Фархадзаде¹⁾, А. З. Мурадалиев¹⁾, Т. К. Рафиева¹⁾, А. А. Рустамова¹⁾

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

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

Реферат. Для энергоблоков 300 МВт на газомазутном топливе, срок службы которых превышает расчетный, при сравнении и ранжировании приходится учитывать не только показатели экономичности (например, удельный расход условного топлива), но и надежности и безопасности. На практике так и поступают. Однако учет этот интуитивный. Интуитивный подход решает данную проблему, но далеко не всегда достоверно. Казалось бы, существуют достаточно полно разработанный математический аппарат для регрессионного и корреляционного анализа, множество алгоритмов и программ расчета. Но есть одна особенность, неучет которой еще больше увеличивает риск ошибочного решения. Дело в том, что среднемесячные данные о технико-экономических показателях энергоблоков не относятся к выборкам из генеральной совокупности, соответствующим нормальному закону распределения, что является необходимым условием применения таких методов. Это неслучайная выборка из конечной совокупности многомерных данных. Естественно, методы классификации многомерных данных не просты, требуют разработки специальных программ расчета, рекомендуемых решения по техническому обслуживанию и ремонту, распределению нагрузок и др. В статье приводится лишь один, но очень важный вопрос проблемы – оценка достоверности предположения о линейной взаимосвязи технико-экономических показателей. Его решение одновременно покажет трудности в сопоставлении эффективности работы энергоблоков стареющего типа. Отмечается, что известный и используемый на практике метод оценки достоверности уравнения линейной регрессии, основанный на построении «доверительного коридора» или «полосы неопределенности», не позволяет ответить на главный вопрос: соответствует ли взаимосвязь рассматриваемых технико-экономических показателей линейной? Предложен новый метод оценки этой взаимосвязи, основанный на построении фидуциальной области возможных реализаций линий регрессии. Показано, что для малых значений числа реализаций выборки значительная часть независимых выборок имеет коэффициент корреляции, превышающий 0,9.

Ключевые слова: энергоблок, технико-экономические показатели, взаимосвязь, линейная регрессия, достоверность, доверительная область, критерий

Для цитирования: Достоверность линейной взаимосвязи технико-экономических показателей энергоблоков 300 МВт тепловых электростанций / Э. М. Фархадзаде [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 2. С. 163–173. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-163-173>

Адрес для переписки

Фархадзаде Эльмар Мехтиевич
Азербайджанский научно-исследовательский
и проектно-исследовательский институт энергетики
просп. Г. Зардаби, 94,
Az1012, г. Баку, Азербайджанская Республика
Тел.: +99 4012 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, the Azerbaijani Republic
Tel.: +99 4012 431-64-07
elmeht@rambler.ru

Certainty of Linear Interrelation of Technical and Economic Parameters of Power Units of 300 MWt Thermal Power Stations

E. M. Farhadzadeh¹⁾, A. Z. Muradaliyev¹⁾, T. K. Rafiyeva¹⁾, A. A. Rustamova¹⁾

¹⁾Azerbaijan Scientific-Research and Design-Prospecting Power Engineering Institute (Baku, the Azerbaijani Republic)

Abstract. For 300 MWt gas-and-oil-burning power units which durability exceeds the estimated one, when comparing and ranking, it is necessary to take into account not only efficiency indicators (for example, the specific consumption of conventional fuel), but also indicators of reliability and safety. In practice, this is exactly what is being done. However, it is being done just by intuition. An intuitive approach solves this problem, but not always certainly. It would seem that there is a quite fully developed mathematical apparatus for regression and correlation analysis, a set of algorithms and calculation programs. But there is one specific feature that, if it is not taken into account, further increases the risk of an erroneous decision. The fact is that the average monthly data on the technical and economic indicators of power units do not belong to the samples from the general population that correspond to the normal distribution law, the latter being a necessary condition for using such methods. This is a non-random sample from a finite set of multidimensional data. Naturally, the methods of classification of multidimensional data are not simple; they require the development of special calculation programs that recommend solutions for maintenance and repair, load distribution, etc. The article presents only one, but very important issue of the problem, viz. the assessment of the reliability of the assumption about the linear relationship of technical and economic indicators. Its solution will simultaneously demonstrate difficulties in comparing the efficiency of aging power units. It is noted that the known and practically used method for assessing the reliability of the linear regression equation, based on the construction of a “confidence corridor” or “uncertainty band”, does not allow one to answer the main question, viz. whether the relationship of the considered technical and economic indicators corresponds to a linear one. A new method for evaluating this relationship is proposed, based on constructing a fiducial domain of possible regression line implementations. It is shown that for small values of the number of sample implementations, a significant part of independent samples has a correlation coefficient exceeding 0.9.

Keywords: power unit, technical and economic parameters, interrelation, linear regression, reliability, confidential area, criterion

For citation: Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Rafiyeva T. K., Rustamova A. A. (2020) Certainty of Linear Interrelation of Technical and Economic Parameters of Power Units of 300 MWt Thermal Power Stations. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (2) 163–173. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-163-173> (in Russian)

Введение

Оценка взаимосвязи между технико-экономическими показателями (ТЭП) энергоблоков тепловых электростанций относится к одному из важнейших условий объективного сравнения и ранжирования энергоблоков по эффективности работы [1, 2]. И если оперативное сравнение и ранжирование энергоблоков, срок службы которых не превышает расчетный, вполне достоверно при традиционном подходе, то в случае превышения расчетного срока службы все в большей степени приходится учитывать не только экономичность работы, но и надежность, и безопасность технического состояния. На практике так и поступают. Только учет этот интуитивный.

Особенно данная необходимость проявляется в условиях, когда уточнение энергетических характеристик энергоблоков становится экономически нецелесообразным [3, 4].

Интуитивный подход решает данную проблему, но далеко не всегда достоверно. Этому активно препятствуют систематический рост стоимости топлива, снижение квалификации персонала, трудности своевременного приобретения запасных узлов, необходимость учета огромного количества факторов, в том числе изменение самих ТЭП. Взаимосвязанные факторы удобны в эксплуатации, так как в определенной степени защищают от неточностей регистрации и расчета ТЭП. Но для количественной оценки интегрального показателя эффективности работы [5] они нежелательны, поскольку искажают оценку интегрального показателя. Казалось бы, в чем проблема? Для этого существует корреляционный и регрессионный анализ [6]. Но не тут-то было: предпосылки применения таких методов далеко не всегда учитывают особенности статистических данных оборудования и устройств (объектов) электроэнергетических систем. Так, среднемесячные значения ТЭП – это не выборка из генеральной совокупности случайных данных, соответствующая некоторому закону распределения. Это не случайная выборка из конечной совокупности многомерных данных, т. е. зависящих от большого числа факторов [7, 8]. Но трудности расчета взаимосвязи ТЭП в основном возникают вследствие супермалого объема многомерных данных. Напомним, что объем выборки менее 30 принято считать малым, а менее 10 – супермалым. И если классические методы оценки взаимосвязи ТЭП ориентированы преимущественно на анализ десятков реализаций случайных величин, то оперативные показатели надежности, экономичности и безопасности объектов электроэнергетической системы вычисляются обычно по единицам реализаций. Например, число среднемесячных значений ТЭП равно числу энергоблоков электростанций, которые для мощных электростанций не исчисляются десятками.

При оценке взаимосвязи ТЭП важнейшим вопросом является ее вид – она линейная или нелинейная, так как от этого зависят формулы расчета коэффициентов корреляции. Поскольку линейная корреляционная связь для выборок из генеральной совокупности изучена достаточно полно, обычно вопрос несколько конкретизируется: насколько правдоподобна линейная взаимосвязь между ТЭП?

Традиционный подход к контролю достоверности предположения о линейной взаимосвязи технико-экономических показателей

Известно, что если коэффициент линейной корреляции не превышает своего критического значения для малочисленных выборок ТЭП, это еще не означает, что взаимосвязь недостаточна [5]. Такое возможно при нелинейной корреляционной связи ТЭП. Поэтому столь важна возможность оценки точности регрессии, которая характеризуется доверительной областью по аналогии с доверительным интервалом. Эта область с вероят-

ностью $(1 - \alpha)$ накрывает истинную линию регрессии. Рассмотрим рекомендуемую последовательность ее расчета [9].

Для построения доверительной области линии регрессии прежде всего определяются коэффициенты данного уравнения. В иллюстративных целях определим эти коэффициенты для среднемесячных значений двух ТЭП: коэффициента полезного действия (КПД) нетто η_n и температуры воздуха после регенеративного воздухоподогревателя (РВП) T_B котельных установок энергоблоков 300 МВт на газомазутном топливе. Расчеты коэффициентов уравнения $\eta_n = (aT_B + b)$ проводим по формулам [7]:

$$a = \frac{\sum \eta_n \sum T_B - n_B \sum \eta_n T_B}{(\sum T_B)^2 - n_B \sum T_B^2}, \quad (1)$$

$$b = M^*(\eta_n) - aM^*(T_B), \quad (2)$$

где $M^*(\eta_n) = [\sum \eta_n] / n_B$; $M^*(T_B) = [\sum T_B] / n_B$.

Далее определяются:

– граничные значения доверительного интервала углового коэффициента a [7]:

$$\underline{a} = a - t_{(1-\alpha/2), (n_d-2)} \sigma_0 \sqrt{\frac{1}{n_B} + \frac{M^*(T_B)^2}{\sum [T_B - M^*(T_B)]^2}}; \quad (3)$$

$$\bar{a} = a + t_{(1-\alpha/2), (n_d-2)} \sigma_0 \sqrt{\frac{1}{n_B} + \frac{M^*(T_B)^2}{\sum [T_B - M^*(T_B)]^2}}, \quad (4)$$

где $t_{(1-\alpha/2), (n_d-2)}$ – статистика Стьюдента; σ_0 – среднее квадратичное значение остаточного суммарного отклонения,

$$\sigma_0 = \frac{1}{n_B - 2} [\sum \eta_n^2 - a \sum T_B \eta_n - b \sum \eta_n]; \quad (5)$$

– граничные значения доверительного интервала для ТЭП η_n по (5):

$$\underline{\eta_n} = M^*(\eta_n) - t_{(1-\alpha/2), (n_d-2)} \frac{\sigma \eta_n}{\sqrt{n_B}}; \quad (6)$$

$$\bar{\eta_n} = M^*(\eta_n) + t_{(1-\alpha/2), (n_d-2)} \frac{\sigma \eta_n}{\sqrt{n_B}}, \quad (7)$$

$$\text{где } \sigma \eta_n = \frac{\sum [\eta_n - M^*(\eta_n)]^2}{n_B - 1}.$$

Результаты расчетов по формулам (1)–(7) приведены в табл. 1, 2. Точность вычислений контролировалась применением онлайн-калькуляторов.

Таблица 1

Исходные данные и их преобразования

Source data and its transformations

№ пп	$\eta_{н,э}$	$T_{в,э}$	$\eta_{н,э} \cdot T_{в,э}$	$\eta_{н,э}^2$	$T_{в,э}^2$	$[T_{в,э} - M^*(T_{в,э})]^2$	$[\eta_{н,э} - M^*(\eta_{н,э})]^2$	$\eta_{н,п}$	$(\eta_{н,э} - \eta_{н,п})^2$
1	80,7	249,9	20166,93	6512,49	62450,01	262,4	5,29	81,3	0,36
2	83,0	268,9	22318,70	6889,00	72307,21	7,8	0	83,3	0,09
3	83,3	267,7	22299,41	6938,89	71663,29	2,6	0,09	83,2	0,01
4	84,0	267,7	22486,80	7056,00	71663,29	2,6	1,00	83,2	0,64
5	83,3	276,9	23065,77	6938,89	76673,61	116,6	0,09	84,2	0,81
6	83,5	266,6	22261,10	6972,25	71075,56	0,3	0,25	83,1	0,16
7	83,5	265,3	22152,55	6972,25	70384,09	0,6	0,25	83,0	0,25
Σ	581,3	1863	154751,26	48279,77	496217,06	392,9	6,97	581,3	2,32

Таблица 2

Результаты расчета интервальной полосы

Results of calculating the interval band

Показатель	$M^*(\eta_{н,э})$	$M^*(T_{в,э})$	n_b	v	a	b	$\sigma^*(\eta_{н,э})$	$\sigma^*(T_{в,э})$	$t_{0,05;v}$	$\sigma^*(\Delta\eta_{н,э})$	$\underline{a}$	$\bar{a}$	$\underline{\eta_{н,э}}$	$\bar{\eta_{н,э}}$	r
Оценка	83	266,1	7	5	0,108	54,3	1	7,5	2,57	0,69	0,019	0,2	83,45	88,44	0,811

Предполагается, что границы доверительной области также линейны, проходят через точки $[M^*(T_{в,э}); \underline{\eta_{н,э}}]$ и $[M^*(T_{в,э}); \bar{\eta_{н,э}}]$. Определим коэффициенты уравнения этих границ:

$$\underline{\eta_{н,э}} = \underline{a}M^*[T_{в,э}] + b; \quad 81,4 = 0,117 \cdot 266,1 + b; \quad b = 50,34;$$

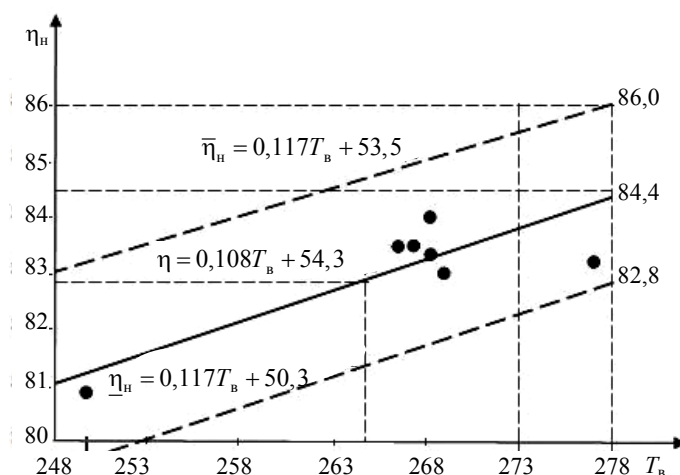
$$\bar{\eta_{н,э}} = \bar{a}M^*[T_{в,э}] + b; \quad 84,6 = 0,117 \cdot 266,1 + b; \quad b = 53,5.$$

Запишем данные уравнения в виде:

$$\left. \begin{aligned} \underline{\eta_{н,э}} &= 0,117T_{в,э} + 50,3; \\ \bar{\eta_{н,э}} &= 0,117T_{в,э} + 53,5. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Для построения граничных значений доверительной области определим координаты еще одной точки, например для $T_{в,э} = 278$ °С, по уравнениям (8). Результаты расчетов: для нижней границы координаты второй точки [278; 82,8], для верхней границы [278; 86].

Графическая иллюстрация корреляционного поля $T_{в,э}$ и $\eta_{н,э}$, линия регрессии $\eta = 0,108T_{в,э} + 54,3$, нижняя и верхняя границы области для $\alpha = 0,05$ приведены на рис. 1.

Рис. 1. Иллюстрация взаимосвязи T_b и η_n Fig. 1. Illustration of the relationship between T_b and η_n

Следует отметить, что несоответствие граничных значений доверительной области уровню значимости α , в принципе, никто и не оспаривает, называя ее «доверительным коридором» или «полосой неопределенности». Более того, нет определенного ответа и на главный вопрос: соответствует ли взаимосвязь рассматриваемых ТЭП линейной?

Оценка фидуциальной области возможных реализаций линий регрессии

Если фидуциальный интервал показателей эффективности работы – это множество их возможных реализаций [10], то фидуциальную область представим как множество возможных линий регрессии. Тогда, снова же по аналогии с фидуциальным интервалом, размещение экспериментальных линий регрессии в данной области будет свидетельствовать о ее принадлежности к множеству линий регрессии независимых выборок. Иначе говоря, взаимосвязь ТЭП может быть представлена линейной, но отражающей взаимосвязь независимых случайных величин, т. е. ТЭП независимы, и наоборот. Кажущаяся сложность формулировок обманчива, поскольку вероятность больших по абсолютной величине коэффициентов корреляции при малых объемах выборок η_b высока.

В качестве примера на рис. 2 приведено фидуциальное распределение коэффициентов линейной корреляции Пирсона для $\eta_b = 3$. Как следует из рисунка, 40 % возможных реализаций коэффициента корреляции превышают 0,80; 30 % – 0,90, а 20 % превышают 0,95. Представляют интерес критические значения коэффициента корреляции K_k : при $\alpha = 0,05$ $K_k = 0,987$, при $\alpha = 0,025$ $K_k = 0,997$, при $\alpha = 0,005$ $K_k = 0,9999$. Заметим, что традиционно к регрессионному анализу рекомендуется переходить при экспериментальном значении $K_s > 0,9$.

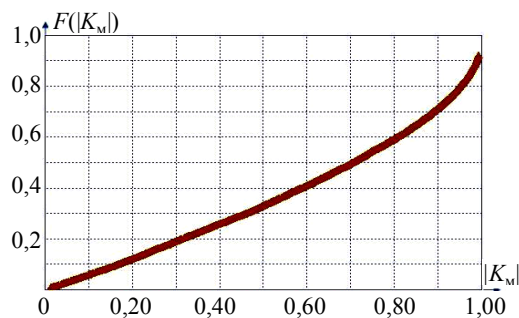


Рис. 2. Фидуциальное распределение абсолютной величины коэффициента корреляции Пирсона при $\eta_b = 3$

Fig. 2. Fiducial distribution of the absolute value of the Pearson correlation coefficient when $\eta_b = 3$

Построение фидуциальной области проводится следующим образом.

1. Моделируются две независимые выборки (в) случайных величин ξ с равномерным распределением объема η_b в интервале $[0; 1]$. Обозначим их через ξ_1, ξ_2 . Независимость их обеспечивается последовательным моделированием подпрограммой RANDU.

2. Вычисляются коэффициенты линейного уравнения регрессии $\xi_1 = (a\xi_2 + b)$ между реализациями ξ_1 и ξ_2 .

3. Пункты 1 и 2 повторяются N раз, где N – число возможных реализаций уравнений регрессии независимых выборок, N в зависимости от η_b исчисляется в десятках тысяч.

4. Проводится ранжирование пар коэффициентов a и b в порядке повышения углового коэффициента a . Эти данные позволяют заключить:

4.1. Имеет место симметрия распределения $F^*(a)$. В иллюстративных целях на рис. 3 приведена статистическая функция распределения $F^*(a)$ для $\eta_b = 3$. Эта особенность позволяет упростить представление критических значений данного коэффициента путем перехода к его абсолютным значениям.

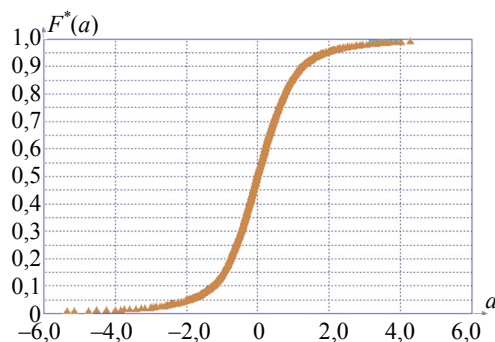


Рис. 3. Статистическая функция распределения углового коэффициента линий регрессии независимых выборок случайных величин

Fig. 3. Statistical function of distribution of the angular coefficient of regression lines of independent samples of random variables

4.2. Критические значения коэффициентов $b_{\alpha/2}$ и $b_{(1-\alpha/2)}$ не соответствуют критическим значениям коэффициентов $a_{\alpha/2}$ и $a_{(1-\alpha/2)}$. Иначе говоря, в уравнении регрессии с угловым коэффициентом, равным, например $a_{(1-\alpha/2)}$, коэффициент b не равен $b_{(1-\alpha/2)}$. Именно влиянием коэффициента b обуславливается неопределенность доверительной области, созданной уравнениями регрессии $\xi_1 = a_{\alpha/2,i}\xi_2 + b_i$ и $\bar{\xi}_1 = a_{(1-\alpha/2),j}\xi_2 + b_j$ (где $i = 1, N; j = 1, N; i \neq j$), изображенными на рис. 4 для ряда α .

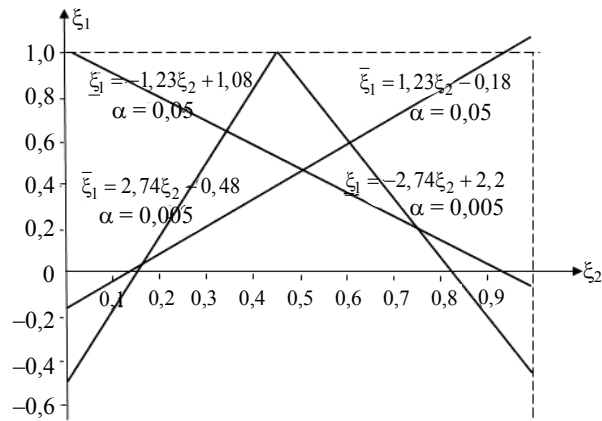


Рис. 4. Граничные значения уравнений линейной регрессии для $\eta_b = 6$, $\alpha = 0,05$, $\alpha = 0,005$

Fig. 4. Boundary values of linear regression equations for $\eta_b = 6$, $\alpha = 0.05$, $\alpha = 0.005$

С учетом вышеизложенного п. 4 несколько изменяется и имеет следующее содержание.

5. Проводятся ранжировка коэффициентов линейной корреляции и оценка их граничных значений для ряда α . Например, для $\alpha = 0,05$ порядковый номер граничных значений определяется как $[(1 - \alpha/2)N]$ полученного вариационного ряда реализации величины a . Результаты расчета доверительных областей уравнений регрессии независимых выборок для случая, когда $b = 0$, приведены на рис. 5.

Эти результаты позволяют провести классификацию возможных реализаций линии регрессии по величине углового коэффициента a , т. е. по скорости изменения функции ξ_1 при изменении аргумента ξ_2 .

Критерий проверки предположения H_1 о линейной взаимосвязи между двумя произвольными ТЭП Π_i^a и Π_j^a , где $i = 1, m_{\Pi}; j = 1, m_{\Pi}; i \neq j$, будет иметь вид:

$$\left. \begin{array}{l} \text{если } \left| a^a \right|_{n_b} \leq \overline{a_{(1-\alpha)n_b}^M}, \text{ то } H \Rightarrow H_1, \\ \text{иначе } H \Rightarrow H_2, \end{array} \right\} \quad (9)$$

где $\Rightarrow$ – индекс, обозначающий соответствие; H_2 – предположение о нелинейной взаимосвязи между ТЭП; «э», «м» – индексы, обозначающие соответственно эксплуатационные данные и данные компьютерного моделирования независимых выборок.

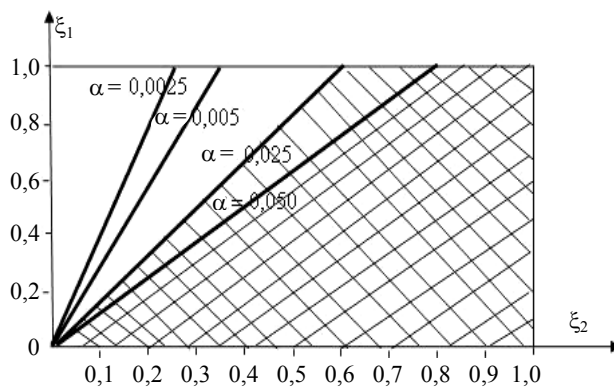


Рис. 5. Доверительные области линий регрессии для $n_b = 6$ и ряда α

Fig. 5. Confidence regions of regression lines for $n_b = 6$ and series of α

При использовании критерия (9) необходимо соблюдать шкалу изменения коэффициента a . Ведь для реальных ТЭП, например η_n и T_b , величина a имеет шкалу, которая намного отличается от шкалы изменения ξ_1 и ξ_2 . Такое преобразование шкалы, например для η_n и T_b , проводится путем перевода реализации η_n и T_b в относительные единицы по формулам:

$$\delta\eta_{n,c} = \frac{\eta_{n,\max} - \eta_{n,i}}{\eta_{n,\max} - \eta_{n,\min}}; \quad (10)$$

$$\delta T_{пв,i} = \frac{T_{b,\max} - T_{b,i}}{T_{b,\max} - T_{b,\min}}, \quad (11)$$

где $\eta_{n,\max}$, $T_{b,\max}$, $\eta_{n,\min}$, $T_{b,\min}$ – наибольшие и наименьшие значения из n_b реализаций.

Результаты расчета углового коэффициента a для $\delta\eta_n$ и δT_b приведены в табл. 3. Если оценка углового коэффициента a для фактических значений η_n и T_b в соответствии с табл. 2 была равна 0,108, то для относительных значений $\delta\eta_n$ и δT_b в соответствии с табл. 3 она существенно возросла и стала равной 0,890.

Нетрудно заметить (табл. 3), что для $\alpha > 0,05$ оказывается справедливым $H \Rightarrow H_1$, т. е. взаимосвязь между η_n и T_b линейна, а при $\alpha \leq 0,05$ справедливо предположение H_2 . И это, наверное, естественно, так как столь же неопределенна значимость их коэффициента корреляции, равного 0,81. Ну, а что же делать? Ответ на этот вопрос мы дадим в следующей статье. Одно можно утверждать точно: аппарат доверительных интервалов здесь бесполезен. И небольшая подсказка: на основе фидуциальных вероятностей мы оценим ошибку второго рода и перейдем к стратегии минимума риска ошибочного решения.

Таблица 3

Результаты расчета коэффициента корреляции и коэффициентов линейной регрессии
Results of calculating the correlation coefficient and linear regression coefficients

№ пп	$\delta\eta_n$	δT_b	$\delta\eta_n\delta T_b$	$\delta\eta_n^2$	δT_b^2	Результаты расчета регрессии
1	1	1	1	1	1	$M^*(\delta T_b) = 0,40;$ $M^*(\delta\eta_n) = 0,286$
2	0,299	0,296	0,088504	0,089401	0,087616	$b = -0,07; a = 0,89$
3	0,212	0,341	0,072292	0,044944	0,116300	$Y = 0,8916x - 0,06951$
4	0	0,341	0	0	0,116300	$r = 0,815$
5	0,201	0	0	0,040400	0	
6	0,147	0,381	0,056007	0,021609	0,145200	
7	0,141	0,430	0,060630	0,019881	0,184900	
Σ	2	2,789	1,27740	1,216200	1,650200	

ВЫВОДЫ

1. Достоверность традиционного подхода к контролю соответствия наблюдаемой корреляционной связи линейной зависимости неопределенна, а доверительные области («коридоры») не предназначены для решения этой задачи.

2. Фидуциальные распределения углового коэффициента линий регрессии a свидетельствуют о полной симметрии относительно $a = 0$, что уже при объеме выборки, равном трем, позволяет перейти к фидуциальным распределениям его абсолютной величины.

3. Предлагается классифицировать линии регрессии на основе критических значений угловых коэффициентов множества линий регрессии с угловым коэффициентом, меньше критического, что позволяет установить принадлежность линии регрессии, построенной по эксплуатационным данным, этому множеству.

4. Рекомендуются новый критерий контроля соответствия наблюдаемой корреляционной связи, основанный на сравнении фактического значения углового коэффициента линейной регрессии с критическим значением. Применение этого критерия требует перевода абсолютных значений реализации технико-экономических показателей в относительные.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фархадзаде Э. М. Метод и алгоритм ранжирования котельных установок блочных электростанций по критерию надежности и экономичности работы / Э. М. Фархадзаде, А. З. Мурадалиев, Ю. З. Фарзалиев // Теплоэнергетика. 2015. Т. 62, № 10. С. 22–29.
2. Совершенствование методов анализа технико-экономических показателей блочных электростанций. Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики / Э. М. Фархадзаде [и др.] // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Минск: БНТУ, 2015. Вып. 66: Актуальные проблемы надежности систем энергетики: материалы Междунар. сем. имени Ю. Н. Руденко. С. 376–382.
3. Дуэль, М. А. Автоматизация определения энергетических характеристик энергооборудования / М. А. Дуэль, Г. И. Канюк, Т. Н. Фурова // Энергоснабжение, энергетика, энергоаудит. 2013. № 2. С. 13–19.
4. 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.
5. Сравнение и ранжирование паротурбинных установок энергоблоков ТЭС по эффективности работы / Э. М. Фархадзаде [и др.] // Теплоэнергетика. 2018. № 10. С. 41–49.

6. Орлов, А. И. Прикладная статистика / А. И. Орлов. М.: Изд-во «Экзамен», 2006. С. 672.
7. Метод и алгоритмы расчета показателей надежности по многомерным данным / Э. М. Фархадзаде [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 1. С. 16–29. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-16-29>.
8. 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/10.21122/1029-7448-2018-61-3-193-206>.
9. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика / А. И. Кобзарь. М.: Физматгиз, 2006. 816 с.
10. Фархадзаде, Э. М. Фидуциальный подход при сравнении однотипных объектов / Э. М. Фархадзаде, А. З. Мурадалиев, С. А. Абдуллаева // Электронное моделирование. 2019. Т. 41, № 1. С. 55–66.

Поступила 15.03.2019 Подписана в печать 17.06.2019 Опубликовано онлайн 31.03.2020

REFERENCES

1. Farkhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Farzaliyev Yu. Z. (2015) Method and Algorithm of Ranking Boiler Plants at Block Electric Power Stations by the Criterion of Operation Reliability and Profitability. *Thermal Engineering*, 62 (10), 708–715. <https://doi.org/10.1134/s0040601515080017>.
2. Farkhadzade E. M., Muradaliyev A. Z., Farzaliyev Yu. Z., Ismailova S. M., Abdullaeva S. A. (2015) Improving Methods for Analyzing Technical and Economic Indicators of Block Power Plants. *Methodological Issues of Studying the Reliability of Large Power Systems. Metodicheskie Voprosy Issledovaniya Nadezhnosti Bol'shikh Sistem Energetiki. Vyp. 66: Aktual'nye Problemy Nadezhnosti Sistem Energetiki: Materialy Mezhdunarodnogo Seminara imeni Yu. N. Rudenko* [Methodical Problems of Research of Reliability of Big Systems of Power Engineering, Issue. 66: Actual Problems of the Reliability of Energy Systems: Materials of the International Seminar name after Yu. N. Rudenko]. Minsk, Belarusian National Technical University, 376–382 (in Russian).
3. Duel' M. A., Kanyuk G. I., Furova T. N. (2013) Automation of Determining Energy Characteristics of Power Equipment. *Energosnabzhenie, Energetika, Energoaudit* [Energy Saving. Power Engineering. Energy Audit], (2), 13–19 (in Russian).
4. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Farzaliyev Y. 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 the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (1), 14–24 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-1-14-24>.
5. Farkhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Farzaliyev Yu. Z., Abdullaeva S. A. (2018) Comparison and Ranking of Steam-Turbine Installations of Thermal Power-Stations' Power-Generating Units by Working Efficiency. *Thermal Engineering*, 65 (10), 708–715. <https://doi.org/10.1134/s0040601518100026>.
6. Orlov A. I. (2006) *Applied Statistics*. Moscow, Ekzamen Publ. 672 (in Russian).
7. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Rafiyeva T. K., Abdullayeva S. A. (2017) Method and Algorithms of Calculation of Parameters of Reliability in Accordance with Multivariate Data. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (1), 16–29 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-16-29>.
8. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Farzaliyev Y. 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 the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 193–206 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-61-3-193-206>.
9. Kobzar' A. I. (2006) *Applied Mathematical Statistics*. Moscow, Fizmatgiz Publ. 816 (in Russian).
10. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Abdullayeva S. A. (2019) Fiducial Approach when Comparing Similar Objects. *Elektronnoe Modelirovanie*, 41 (1), 55–66 (in Russian). <https://doi.org/10.15407/emodel.41.01.055>.

Received: 15 March 2019

Accepted: 17 June 2019

Published online: 31 March 2020

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-174-192>

УДК 621.311.21

Разработка гелиоаккумуляционной сушильной установки на основе теоретических исследований аккумуляции солнечной энергии

Ж. Э. Сафаров¹⁾, Ш. А. Султанова¹⁾, Г. Т. Дадаев¹⁾

¹⁾Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
(Ташкент, Республика Узбекистан)

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

Реферат. Рассмотрен процесс нагрева обезвоживаемого объекта в инфракрасной гелио-сушильной установке (с парафином на дне) с аккумуляцией солнечной энергии. Для решения этой задачи принято, что теплоемкость парафина превосходит теплоемкость обезвоживаемого объекта. На верхний слой падают ИК-лучи, а также происходит теплообмен за счет тепломассообмена с поверхностным воздухом, находящимся между металлической пластиной и обезвоживаемым объектом. Приведены уравнения теплопроводности для обезвоживаемого объекта, определена его связь на границе раздела фаз с помощью равенства температур и потока теплоты. Для экспозиции перегрева с периодом 6,5 ч время прохождения границы раздела фаз, согласно закону движения границы расплавления (затвердения), определяли по формуле $\xi = \alpha\sqrt{6,5} \text{ ч} \cong 12 \text{ ч}$. Получена оптимальная толщина слоя аккумулирующего парафина. На основе теоретических исследований проводились опыты по изучению температурного поля различных теплоаккумулирующих материалов в лаборатории Ташкентского государственного технического университета. Выявлено, что из всех теплоаккумулирующих материалов парафин обладает лучшей способностью удерживания теплоты при его толщине 2–4 см. Сконструирован оптимальный вариант гелиоаккумуляционной сушильной установки с аккумулятором теплоты – парафином. В частности, 2–4 см слоя парафина массой 50 кг с соответствующей плоской поверхностью в пересчете на удельную теплоемкость испарения – это 2400 кДж/кг. Удельное значение плавления парафина (150 кДж/кг) позволяет дополнительно испарять 5,8 л влаги при сушке объектов. Предлагаемая гелиоаккумуляционная сушильная установка может использоваться для обезвоживания лекарственных трав.

Ключевые слова: гелиоаккумуляционная сушильная установка, теплопроводность, температура, парафин, гелиоприемник

Для цитирования: Сафаров, Ж. Э. Разработка гелиоаккумуляционной сушильной установки на основе теоретических исследований аккумуляции солнечной энергии / Ж. Э. Сафаров, Ш. А. Султанова, Г. Т. Дадаев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 2. С. 174–192. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-174-192>

Адрес для переписки

Сафаров Жасур Эсиргапович
Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
ул. Университетская, 2,
100095, г. Ташкент, Республика Узбекистан
Тел.: +998 71 227-15-18
jasursafarov@yahoo.com

Address for correspondence

Safarov Jasur E.
Tashkent State Technical University
named after Islam Karimov
2, University str.,
100095, Tashkent, Republic of Uzbekistan
Tel.: +998 71 227-15-18
jasursafarov@yahoo.com

Development of Solar Accumulating Drying Equipment Based on the Theoretical Studies of Solar Energy Accumulation

J. E. Safarov¹⁾, Sh. A. Sultanova¹⁾, G. T. Dadayev¹⁾

¹⁾Tashkent State Technical University named after Islam Karimov (Tashkent, Republic of Uzbekistan)

Abstract. The process of heating a dewatered object in an infrared solar drying plant (with paraffin on the bottom) with solar energy storage is considered. To solve this problem, it is assumed that the heat capacity of paraffin exceeds the heat capacity of the dehydrated object. Infrared rays fall on the upper layer, and heat exchange takes place due to heat and mass transfer with the surface air located between the metal plate and the object to be dehydrated. The equations of thermal conductivity for a dewatered object are given, its relationship at the phase interface is determined using the equality of temperature and heat flow. For an exposure of overheating with a period of 6.5 h, the time of passage of the phase boundary in accordance with the law of motion of the spreading (hardening), was determined according to the formula of $\xi = \alpha\sqrt{6.5} \text{ h} \cong 12 \text{ h}$.

The optimal thickness of the accumulating paraffin layer was ascertained. On the basis of the theoretical studies, experiments were conducted to study the temperature field of various heat-accumulating materials in the laboratory of Tashkent State Technical University. It was found that of all heat-accumulating materials, paraffin has the best heat retention ability when its thickness is of 2–4 cm. The optimal variant of a solar accumulator drying plant with a heat accumulator, viz. paraffin has been designed. In particular, 2–4 cm of paraffin layer with a mass of 50 kg with a corresponding flat surface in terms of specific heat of evaporation is 2400 kJ/kg. The specific melting value of paraffin (150 kJ/kg) allows additional evaporation of 5.8 l of moisture when drying objects. The proposed solar accumulator drying plant can be used for dehydration of medicinal herbs.

Keywords: solar accumulating drying equipment, thermal conductivity, temperature, paraffin, solar collector

For citation: Safarov J. E., Sultanova Sh. A., Dadayev G. T. (2020) Development of Solar Accumulating Drying Equipment Based on the Theoretical Studies of Solar Energy Accumulation. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (2), 174–192. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-174-192> (in Russian)

Введение

Каждый год почти $5 \cdot 10^{24}$ Дж энергии обеспечивается Солнцем и попадает на поверхность Земли. Это количество в 10000 раз превышает фактическое годовое потребление энергии во всем мире. Среди различных доступных устойчивых энергетических ресурсов солнечная энергия в последнее время превратилась в наиболее важный востребованный источник возобновляемой энергии благодаря круглогодичному изобилию солнечного света, а также технологическим достижениям в захвате световой энергии [1–8].

Принципы теплового аккумулярования

Одним из возможных мероприятий, позволяющих в различных областях отраслей экономики более эффективно использовать тепловую энергию, является аккумулярование теплоты посредством применения различ-

ных теплоаккумулирующих материалов (ТАМ) и аккумуляторов теплоты (АТ) всевозможных конструкций [9–14].

В работе М. Ю. Ошчепкова [15] изучены накопительные солнечные водонагреватели (НСВ). В [16–19] рассмотрены НСВ из полимерных и композиционных материалов, учитывая основную тенденцию рынка, направленную на снижение стоимости НСВ при обеспечении высоких тепловых характеристик [20]. В процессе разработки НСВ были оптимизированы его параметры, определены основные проектные решения [21] и проведено численное моделирование рабочих процессов [22, 23]. В настоящее время совершенствуются конструкции, проводятся исследования материалов, технологий и теплотехники для подготовки установок к серийному производству [24, 25].

Конструкции накопительных емкостей НСВ очень разнообразны. Существенное влияние на эффективность таких нагревателей оказывает температурное расслоение в резервуаре, возникающее как при нагреве за счет поглощения солнечного излучения, так и при подаче холодной воды под слой горячей жидкости, когда нагретую воду берут из верхней части резервуара [26]. Суточный график потребления горячей воды очень неравномерен и имеет резкие пики потребления, в течение которых оно достигает нескольких литров в минуту, а объем забираемой воды – десятков литров [27], что составляет значительную часть объема аккумуляторного бака. Для таких пиковых нагрузок рассмотрены гидродинамические процессы в резервуаре: влияние скорости потока, угол установки резервуара, относительное положение давления и приема соединительной трубы от степени стратификации в секционированном баке нагревателя. В [15] смоделирован накопительный бак НСВ с апертурой $1,2 \cdot 1,3 \text{ м}^2$ и объемом 100 л, разделенный на семь секций для прочности поглощающих панелей.

Теплоаккумулирующие материалы и их классификация

Важнейшими характеристиками системы теплового аккумулирования энергии являются [9]:

- емкость на единицу объема или веса;
- рабочий интервал температур, т. е. температуры теплоносителя на входе и выходе из системы;
- способы подачи и отбора теплоты и соответствующие перепады температур;
- температурная стратификация в аккумуляторе;
- мощность, требуемая для подвода и отвода теплоты;
- объемы контейнеров, баков или других конструктивных элементов, связанных с системой аккумулирования;
- средства регулирования тепловых потерь аккумулятора;
- стоимость изготовления и эксплуатации.

Выбор аккумуляторов теплоты зависит от уровня температур, масштаба установки и длительности аккумулирования теплоты.

По уровню температуры аккумулирования АТ подразделяются на три группы: низко- ($35\text{ }^{\circ}\text{C} < t < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$), средне- ($100\text{ }^{\circ}\text{C} < t < 500\text{ }^{\circ}\text{C}$) и высоко-температурные ($t > 500\text{ }^{\circ}\text{C}$). По использованию теплоты они могут быть классифицированы как мелко- (для децентрализованных потребителей) и крупномасштабные (для крупных централизованных систем). По длительности хранения аккумуляторы теплоты подразделяются на кратко- (1–2 сут.), среднесрочные (до 1 мес.) и межсезонные (до полугода) [9].

Уровень температуры, масштаб аккумулирующей установки и необходимая длительность хранения теплоты определяют требования к конструкции аккумуляторов, выбору теплоаккумулирующих материалов. Причем чем выше температура аккумулирования, тем сложнее обеспечить большую длительность аккумулирования из-за существующих тепловых потерь, а значит, увеличивает возможную длительность хранения запасенной энергии. Поэтому от желаемой длительности хранения теплоты зависят вид, конструкция и стоимость тепловых аккумуляторов.

Теплоаккумулирующие материалы различаются в зависимости от класса материала, способа накопления и отдачи теплоты, цикличности работы (рис. 1) [28].

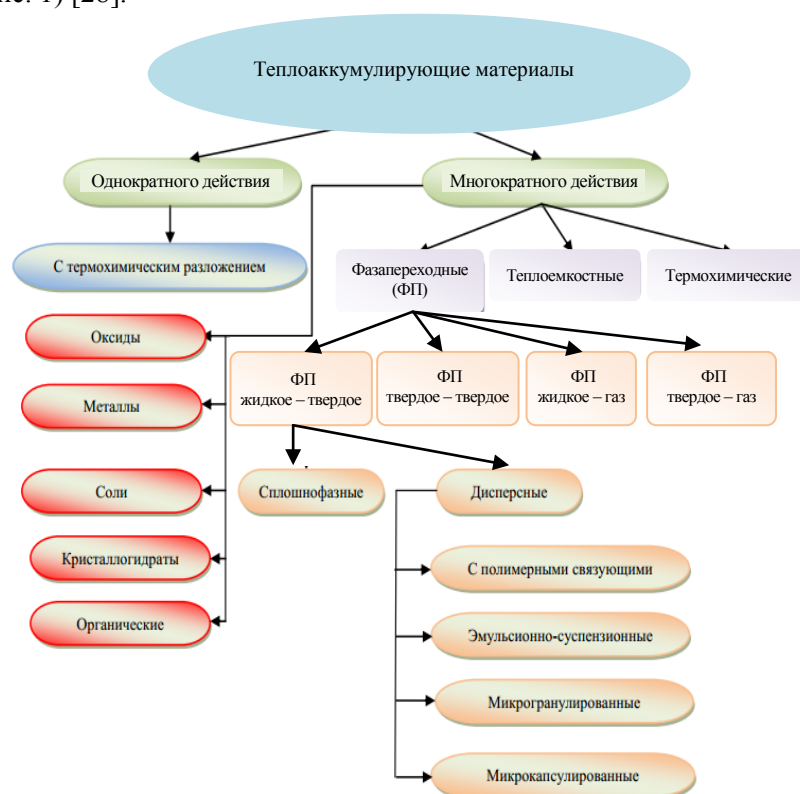


Рис. 1. Схема классификации теплоаккумулирующих материалов

Fig. 1. Classification scheme of heat storage materials

Немаловажное значение при разработке аккумулирующей установки имеет выбор теплоаккумулирующих материалов. Поэтому оптимизация характеристик ТАМ вызывает большой интерес во всем мире [9, 29].

В [30] рассмотрено моделирование tandemного тонкопленочного солнечного элемента на основе CuInSe_2 . Предложена оригинальная структура тонкопленочного солнечного элемента при tandemном соединении фотоэлектрического преобразователя, состоящего из слоев CuInSe_2 , CdS и термоэлектрического, выполненного на основе CuInSe_2 .

Сегодня разработка гелиоаккумуляционных сушильных установок, работающих на солнечной энергии с применением теплоаккумулирующего носителя, считается актуальной задачей. Высокая стоимость топливно-энергетических ресурсов заставляет решать вопросы использования возобновляемых источников энергии в комплексе с автономными средствами для сушки продуктов лесного и сельского хозяйства [31].

В г. Фреено (Калифорния, США) работает сушильная установка площадью 1951 м^2 , где в теплоаккумуляторе содержится 700 т щебня, который может отдавать запасенную теплоту для сушки в течение 24 ч. Комбинированная система удовлетворяет 80 % потребностей в теплоте. В США западным региональным центром в Беркли разрабатывалась также гелиоаккумуляционная установка с использованием солнечных коллекторов [32, 33].

Профессор Дагамэ [32, 33] собрал сведения о 142 фирмах, занимающихся гелиосушкой. Причем большинство гелиосушилок предназначены для сушки сельхозпродуктов. Анализ конструктивных особенностей рассмотренных установок показывает, что все они прерывистого действия. Это обусловлено требованием простоты при их создании, в то время как непрерывный процесс требует механизации движения тележек с продуктами, что ведет к определенному усложнению конструкции. Абсолютное большинство установок не оборудованы системой аккумулирования тепловой энергии, которая является дорогостоящей и не всегда надежной. В единичных устройствах в качестве аккумуляторов используются емкости, заполненные галечником. Во многих установках применяется принудительная циркуляция. Имеются схемы гелиосушилок с рециркуляцией воздуха, а также с топливным дублером, причем использование последнего сказывается на стоимости установки, одновременно увеличивая эффективность ее использования. Собранная Дагамэ информация содержит следующие данные: тип сушилки; наличие солнечных коллекторов, топливного дублера, аккумулятора теплоты, системы для рециркуляции воздуха; способ циркуляции сушильного агента. В проделанном Дагамэ обзоре гелиосушилки сгруппированы между собой по виду высушиваемого материала. При этом специфичность конкретного вида сельхозпродукта отражается и на конструкции установки. Так, гелиосушилки для сена и зерна, не работающие при естественной конвекции, относятся к камерным типам, и большинство из них снабжены топливным дублером, в то время как при

сушке различных продуктов используются все типы сушилок. Большая часть таких установок имеют естественную конвекцию. Это объясняется тем, что сушилки для растительного материала установлены в развивающихся странах или предназначены для использования в домашних условиях. Экономические и политические аспекты применения гелиосушилок для различных стран имеют свои особенности. Так, в развивающихся государствах это обусловлено прежде всего необходимостью уменьшения потерь сельхозпродукции и улучшения качества высушиваемого продукта, что способствует решению продовольственной проблемы.

Суточная периодичность поступления солнечной радиации заставляет искать способы аккумуляирования полученной от Солнца теплоты с тем, чтобы использовать ее в дальнейшем в соответствии с графиком потребления для бытовых и производственных целей. В зависимости от продолжительности рабочего цикла есть часовые, суточные и сезонные аккумуляторы теплоты. Различаются они и по температурному диапазону: в системах воздушного отопления температура аккумулятора составляет примерно 35–40 °С, в системах горячего водоснабжения 37–55 °С, в системах водяного отопления до 90 °С, а на гелиоэлектростанциях она может быть 250 °С и выше [34–36].

В настоящее время в отраслях экономики используются гелиотехнические установки на основе солнечной энергии (различные типы солнечных теплиц, парников, опреснителей, водонагревателей, сушилок).

Одна из важных и сложных проблем, стоящих перед пищевой и фармацевтической промышленностью, – всемерное обеспечение населения качественными продуктами питания. Основная задача для предприятий комплекса – сокращение времени переработки сырья, снижение расходов электроэнергии и трудовых затрат, повышение качества конечной продукции, совершенствование технологических процессов сушки [37–39].

Теоретические исследования в области аккумуляции солнечной энергии

В гелиосушильной установке для аккумуляции теплоты используется парафин – воскоподобное вещество, представляющее собой смесь твердых углеводородов предельного ряда состава от $C_{18}H_{38}$ до $C_{35}H_{72}$, получаемое в результате переработки нефти или сланцевого масла. Состав и свойства парафинов зависят от природы нефти и способа получения этих продуктов. Температура плавления данного материала 45–52 °С, температура кипения 350 °С.

Технические характеристики парафина по ГОСТ 23683–89:

- внешний вид – кристаллическая масса белого цвета;
- температура плавления – не ниже 52 °С;
- массовая доля масла – не более 0,80 %;

- цвет, условные марки – не более 4;
- запах отсутствует;
- бензопирен, сера, вода, механические примеси, водорастворимые кислоты и щелочи отсутствуют [40].

Рассмотрим процесс начала нагрева обезвоживаемого объекта в инфракрасной гелиосушильной установке (с парафином на дне) с аккумуляцией солнечной энергии. Для решения этой задачи принято, что теплоемкость парафина превосходит теплоемкость обезвоживаемого объекта. Пусть на верхний слой падают ИК-лучи, а также происходит теплообмен за счет тепломассообмена с поверхностным воздухом, находящимся между металлической пластиной и обезвоживаемым объектом. Сначала запишем уравнение теплопроводности для обезвоживаемого объекта, затем определим его связь на границе раздела фаз с помощью равенства температур и потока теплоты. Использование указанной выше особенности позволяет упростить систему уравнений. Итак, имеем формулу теплопроводности для парафинового слоя толщиной l , где поверхностный слой получает теплоту в количестве q , которая является результатом инфракрасного и воздушного нагрева:

$$\begin{cases} u_t = a^2 u_{xx}; \\ v_1 u_x \big|_{x=0} = q; \\ u_x \big|_{x=l} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Для нижней границы запишем условие отсутствия потока теплоты, так как там имеется теплоизоляционный слой. При решении данной задачи введем функцию $V = V(x, t)$, полагая, что

$$u = x \left(1 - \frac{x}{2l} \right) q + V(x, t). \quad (2)$$

Тогда имеем $V_x \big|_{x=0} = 0$ и систему уравнений:

$$\begin{cases} V_t = a^2 V_{xx}; \\ V_x \big|_{x=0} = 0, \\ V_x \big|_{x=l} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Порядок решения данного параболического уравнения известен. С помощью метода разделения получаем

$$V = \sum V_k(t) \frac{\pi}{l} kx, \quad (4)$$

где $V_k(t) = V_k(0) l^{-a^2 \frac{\pi}{l} kt}$.

Неизвестные постоянные $V_k(0)$, определяем из начальных условий, считая, что $u = u_0 = \text{const}$:

$$u_0 = x \left(1 - \frac{x}{2l} \right) q + V(0, x). \quad (5)$$

С помощью обратного преобразования Фурье, т. е. умножая (5) на $\cos \frac{\pi}{l} kx$, поочередно на k и интегрируя от 0 до x , получим окончательные значения коэффициентов.

Обратная задача – охлаждение парафина – аналогична в случаях, если система замкнута. Но в рассматриваемой системе происходит испарение, где по мере охлаждения собирается энергия с поверхности обезвоживаемого объекта. Если скорость процесса испарения пропорциональна концентрации влаги в поверхностном слое, т. е.

$$\frac{dn}{dt} = cn, \quad (6)$$

где c – коэффициент испаряемой способности, зависящий от формы и других состояний материала, а также от разницы парциальных давлений – между внутренним и внешним давлением паров воды, то это позволяет написать выражение об удалении энергии в виде фазовых переходов «жидкость – пар» в форме

$$q^+ = q_0^+ l^{-ct}. \quad (7)$$

Тогда меняется граничное условие, и вместо (1) получим систему уравнений с другим граничным условием на поверхностном слое:

$$\begin{cases} u_t = a^2 u_{xx}; \\ ku_x \big|_{x=0} = q_0^* l^{-ct}; \\ u_x \big|_{x=l} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Для того чтобы система (8) решалась методом разделения переменных, следует применить граничное условие на поверхности аналогично введению функции $V(x, t)$

$$u = u_2 = x \left(1 - \frac{x}{2l} \right) q(t) + V(x, t) + \beta(t), \quad (9)$$

где $\beta = \frac{q^1(t)}{l}$.

С учетом разложения функции Фурье получаем:

$$x\left(1 - \frac{x}{2l}\right) \text{ будет } A_k = \frac{1}{2\pi} \int_0^l x\left(1 - \frac{x}{l}\right) \cos \frac{\pi}{l} kx dx; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \sum A_k \cos \frac{\pi}{l} kx q^x(t) + \sum \dot{V}_k \cos \frac{\pi}{l} kx + \dot{\beta}(t) = \\ = -a^2 \sum V_k(t) \left(t \frac{\pi}{l} k\right)^2 \cos \frac{\pi}{l} kx - \frac{q^1(t)}{l}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $\dot{\beta} = \frac{\dot{q}}{l}(t)$.

Из (11) получим

$$\dot{A}kq^+ + \dot{V}_k(t) = -a^2 \left(\frac{\pi}{l} k\right)^2 V_k(t). \quad (12)$$

Решением (12) будет уравнение

$$V_k(t) = V_k(0) l^{-\left(\frac{\pi}{l} k\right)^2 t} - A_k l^{-\left(\frac{\pi}{l} k\right)^2 t} \int_0^t l^{\frac{a^2 \pi^2}{l^2} t' k} q^+(t') dt'. \quad (13)$$

Формула (13) позволяет получить окончательное решение в виде Фурье компонентов (8).

В относительно замкнутом объеме, где происходит перегрев камеры, температура достигает таких значений, при которых аккумулирующий слой начинает расплавляться. Если для плоского слоя температуру обозначить $u = u(x, t)$, а расплавление происходит в его верхней части, то получим задачу о фазовых переходах с критической точкой $u = u^*$. Если энергия продолжает поступать постоянно в течение времени, то с момента $u \geq u^*$ начинается расплавление.

Рассмотрим задачу о расплавлении (затвердении) и движении межфазовой плоскости по оси x . Пусть при $x = 0$, т. е. в начале координат, начинается расплавление. При поступлении внешней энергии и отводе энергии от аккумулирующих ее материалов (например, паста томата над парафиновым слоем) появляется поверхность разделения двух фаз: первая – верхняя жидкая фаза при расплавлении (твердая фаза при затвердении) и вторая – нижняя твердая фаза (жидкая фаза при затвердении). Движение тепловой энергии, связанное с теплопроводностью из внутренних частей, описывается уравнением теплопроводности с коэффициентами теплопроводности k_1 и k_2 , соответствующими температурным полям u_1 и u_2 . Аналогичная задача решается в случае определения замерзания поверхности Земли.

При движении поверхности раздела происходит выделение скрытой теплоты затвердения, а на поверхности раздела фазового перехода температура все время остается постоянной. Теперь рассмотрим условия задачи на поверхности раздела (рис. 2–4).

Рис. 2. К задаче о движении границ расплавления (затвердения) материала, аккумулирующего солнечную энергию: 1 – верхняя часть парафина, $\xi \leq x \leq 0$; 2 – поверхность раздела между жидкой и твердой фазами, $x = \xi(t)$; 3 – дно поверхности нижней фазы, $\infty \geq x > \xi(t)$

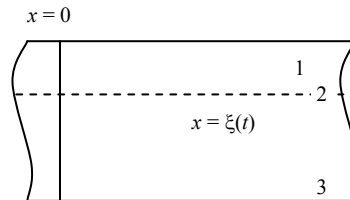


Fig. 2. Towards the problem of the motion of the melting (hardening) boundaries of a substance that accumulates solar energy: 1 – upper part of paraffin $\xi \leq x \leq 0$; 2 – interface between liquid and solid masses $x = \xi(t)$; 3 – bottom surface of the lower phase $\infty \geq x > \xi(t)$

Рис. 3. Нагрев парафина:
1 – граничное условие, $k_1 u_x = q$
(q – мощность проникающей теплоты);
2 – изоляционное дно

Fig. 3. Paraffin heating:
1 – boundary condition $k_1 u_x = q$,
where q is power penetrating heat;
2 – insulating bottom

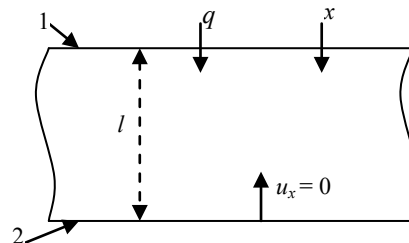
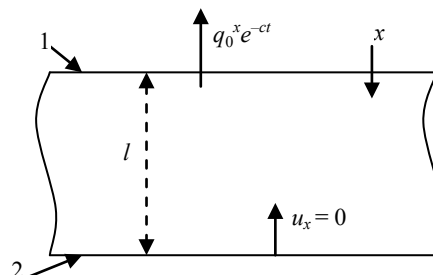


Рис. 4. Граничные условия задачи

Fig. 4. The boundary conditions of the problem



Запишем дополнительное условие для раздела фаз

$$k_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} \Big|_{x=\xi} - k_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} \Big|_{x=\xi} = \lambda \rho \frac{d\xi}{dt}. \quad (14)$$

А для каждой фазы приведем следующие уравнения:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_1}{\partial t} = a_1^2 \frac{\partial u_1}{\partial x}, & 0 < x < \xi; \\ \frac{\partial u_2}{\partial t} = a_2^2 \frac{\partial u_2}{\partial x}, & \xi < x < \infty, \end{cases} \quad (15)$$

где u_1 , u_2 – соответствующие температуры фаз.

С учетом дополнительных условий:

$$\begin{cases} u_1(0, t) = u_1^*; \\ u_2(0, t) = u_0. \end{cases} \quad (16)$$

Условия на границе замерзания следующие:

$$\begin{cases} u_1 = u_2 = u^* \text{ при } x = \xi; \\ k_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} \Big|_{x=0} - k_2 \frac{\partial u_1}{\partial x} \Big|_{x=\xi} = \lambda \rho \frac{d\xi}{dt}. \end{cases} \quad (17)$$

По аналогии с решением задач параболического типа можно применять метод подобия, для чего следует ввести $\varphi = u^* - u_2$. Соответственно $\varphi_1 = u^* - u_1$ и $\varphi_2 = u^* - u_2$.

Тогда вместо (17) имеем:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_2 = 0 \text{ при } x = \xi; \\ k_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \Big|_{x=\xi} - k_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \Big|_{x=\xi} = \lambda \rho \frac{d\xi}{dt}; \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \varphi_1(0, t) = u^* - u_1^*; \\ \varphi_2(0, t) = u^* - u_2^*; \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} a_1^2 \frac{d^2 f_1}{dz^2} = -2z \frac{df_1}{dz}, & 0 < z < \xi; \\ a_2^2 \frac{d^2 f_1}{dz^2} = -2z \frac{df_2}{dz}, & 0 < z < \infty, \end{cases} \quad (20)$$

где $u = f\left(\frac{x}{\sqrt{x}}\right)$.

Решение систем (18)–(20) примет вид:

$$f(z) = \begin{cases} f_1 = A_1 + B_1 \vartheta\left(\frac{z}{2a_1}\right), & 0 < z < \alpha; \\ f_2 = A_1 + B_2 \vartheta\left(\frac{z}{2a_2}\right), & \alpha < z < \infty, \end{cases} \quad (21)$$

где ϑ – интеграл ошибок, известная функция.

Для определения постоянных A_1, A_2, B_1, B_2 используются условия (18)–(20), из которых с учетом (21) имеем следующее:

$$\xi = \alpha \sqrt{t}, \quad (22)$$

где α – константа.

Соотношение (22) описывает закон движения границы расплавления (затвердения).

Для постоянных A_1, A_2, B_1, B_2 получим:

$$\begin{aligned} A_1 &= u^* - u_1(0, t); & A_2 &= -\frac{u^* - u_2(x_1, 0)}{1 - \vartheta\left(\frac{1}{2a_2}\right)}; \\ B_2 &= \frac{u^* - u_1(0, t)}{\vartheta\left(\frac{1}{2a_1}\right)}; & B_2 &= \frac{u^* - u_2(x_1, 0)}{1 - \vartheta\left(\frac{1}{2a_2}\right)}. \end{aligned} \quad (23)$$

С помощью (14) и (18) для определения α можно получить трансцендентное уравнение, которое решают численно:

$$\frac{k_1 [u^* - u_1(0, t)] e^{-\frac{\alpha^2}{4a_1^2}}}{a_1 \vartheta\left(\frac{\alpha}{2a_1}\right)} + \frac{k_2 [u^* - u_2(x_1, 0)] e^{-\frac{\alpha^2}{4a_2^2}}}{a_2 \left[1 - \vartheta\left(\frac{\alpha}{2a_2}\right)\right]} = -\lambda \rho \alpha \frac{\sqrt{\pi}}{2}. \quad (24)$$

Если $u^* = u_1(x_1, 0)$, т. е. начальная температура второй фазы равна температуре расплавления (затвердения), то формулы (23), (24) упрощаются.

Обозначив $\beta = \frac{\alpha}{2a_2}$, получим уравнение, решаемое графическим способом:

$$\frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{e^{-\beta^2}}{\vartheta(\beta)} = -\frac{\lambda \rho a_1^2}{k_1 [u^* - u(x_1, 0)]} \beta. \quad (25)$$

Выше показаны процессы нагрева и охлаждения, которые являются линейными задачами уравнения математической физики с известными решениями. Данные исследования проведены с целью получения результатов для организации сушки лекарственных трав в гелиоаккумуляционной сушильной установке при движении границы фазового перехода с применением метода подобия [41–43].

Гелиоаккумуляционная сушильная установка и экспериментальные исследования

На основе выполненных теоретических исследований разработана энергосберегающая инфракрасная гелиосушильная установка с аккумуляцией солнечной энергии для сушки лекарственных трав (рис. 5).

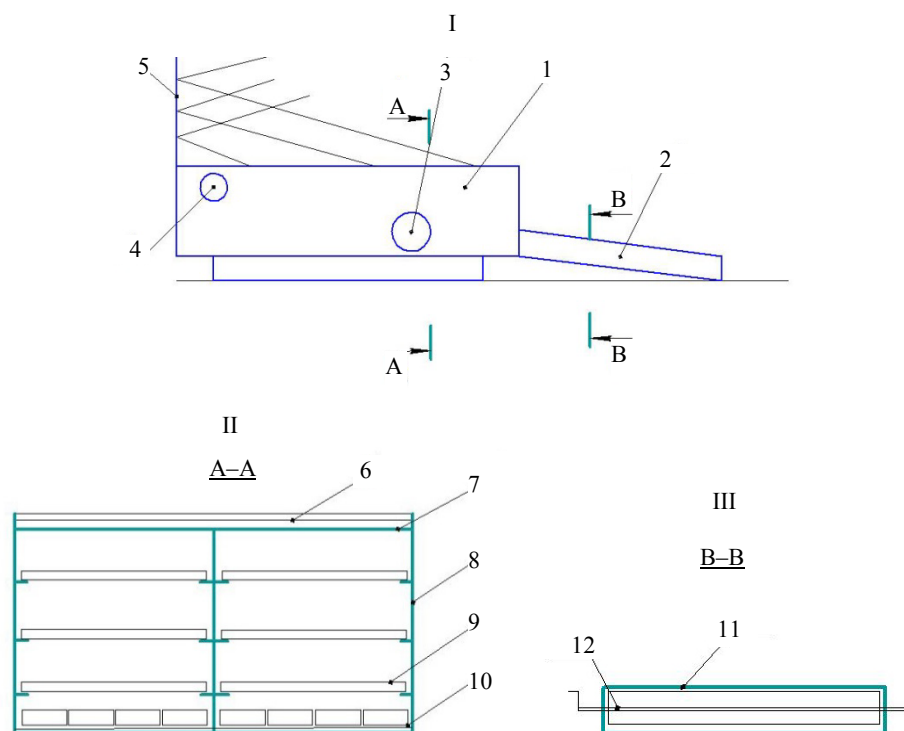


Рис. 5. Инфракрасная гелиосушильная установка с аккумуляцией солнечной энергии:

1 – общий вид устройства; 2 – вспомогательный теплообъемник солнечной энергии;
3, 4 – циркуляционное отверстие для естественной конвекции воздуха;
5 – отражатель солнечных лучей; 6 – двуслойное стекло; 7 – специальная керамическая поверхность; 8 – стенка камеры; 9 – сетчатый стеллаж; 10 – аккумулятор солнечной энергии; 11 – вспомогательная нагревательная камера; 12 – верхнее пленочное покрытие, установленное шибером; I – общий вид устройства сбоку; II, III – поперечный разрез А–А и В–В

Fig. 5. The infrared solar drying plant with accumulation of solar energy: 1 – general view of the installation; 2 – auxiliary solar energy heat collector;
3, 4 – circulation holes for natural air convection; 5 – reflector of the sun rays;
6 – double-layer glass; 7 – special ceramic surface; 8 – chamber wall; 9 – net shelving;
10 – solar power battery; 11 – auxiliary heating chamber; 12 – upper film coating installed by the gate; I – side general view of the device; II, III – cross section A–A, B–B

На основе полученных в лаборатории Ташкентского государственного технического университета результатов проводился эксперимент по изучению температурного поля различных теплоаккумуляционных материалов. Авторами была изготовлена энергосберегающая инфракрасная гелиосушильная установка с аккумуляцией солнечной энергии. Результаты темпа нагрева и процесса падения температуры материалов толщиной слоя 2 и 4 см приведены на рис. 6–9.

Из рис. 6–9 видно, что скорость нагрева парафина значительно выше, чем песка, соли и кирпича, однако потери теплоты у парафина происходят

медленнее. Парафин обладает лучшей способностью удерживания теплоты, чем другие материалы, при толщине слоя 2 см, хотя при толщине слоя более 4 см нагрев соли происходит несколько быстрее.

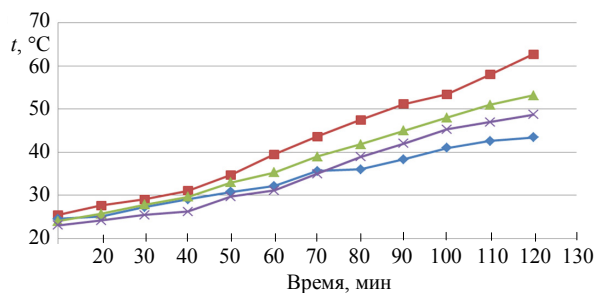


Рис. 6. Динамика нагрева материалов с толщиной слоя 2 см:

■ – парафин; ◆ – песок; ▲ – соль; ✕ – кирпич

Fig. 6. Curves of the dynamics of heating when using different materials with a layer thickness of 2 cm:

■ – paraffin; ◆ – sand; ▲ – salt; ✕ – brick

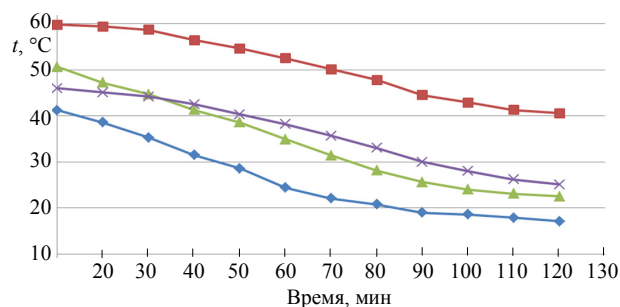


Рис. 7. Динамика падения температуры для материалов с толщиной слоя 2 см:

■ – парафин; ◆ – песок; ▲ – соль; ✕ – кирпич

Fig. 7. Curves of the dynamics of the temperature drop when using different materials with a layer thickness of 2 cm:

■ – paraffin; ◆ – sand; ▲ – salt; ✕ – brick

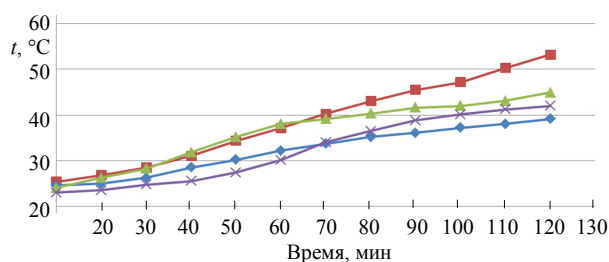


Рис. 8. Динамика нагрева материалов с толщиной слоя 4 см:

■ – парафин; ◆ – песок; ▲ – соль; ✕ – кирпич

Fig. 8. Curves of the dynamics of heating when using different materials with a layer thickness of 4 cm:

■ – paraffin; ◆ – sand; ▲ – salt; ✕ – brick

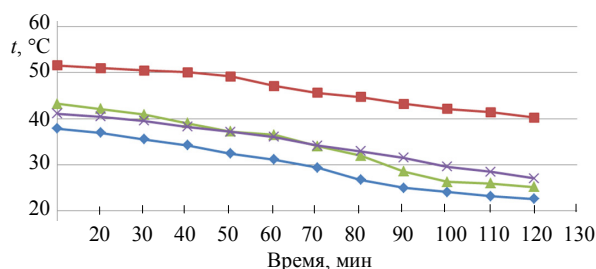


Рис. 9. Динамика падения температуры для материалов с толщиной слоя 4 см:

■ — парафин; ◆ — песок; ▲ — соль; ✕ — кирпич

Fig. 9. Curves of the dynamics of the temperature drop when using different materials with a thickness of 4 cm:

■ — paraffin; ◆ — sand; ▲ — salt; ✕ — brick

ВЫВОДЫ

1. Для экспозиции перегрева с периодом 6,5 ч время прохождения границы раздела фаз, согласно закону движения границы расплавления (затвердения) (22), определяли по формуле $\xi = \alpha\sqrt{6,5 \text{ ч}} \approx 12 \text{ ч}$. Получена оптимальная толщина слоя аккумулирующего парафина. Это позволяет избегать перегрева, сохранять биоактивные вещества путем снижения внутрикамерной температуры, увеличивать время медленной сушки и в ночное время использовать парафин для экономии энергии (в частности, 2–4 см слоя парафина массой 50 кг с соответствующей плоской поверхностью в пересчете на удельную теплоемкость испарения 2400 кДж/кг). Удельное значение плавления парафина 150 кДж/кг позволяет дополнительно испарять 5,8 л влаги при сушке продуктов.

2. Предложен оптимальный вариант конструкции, в которой аккумулятором теплоты является парафин, выполняющий функции ее накопителя, т. е. сушильного агента.

3. Разработанная гелиоаккумуляционная сушильная установка отличается простотой схемы и относительно низкой себестоимостью, что позволяет применять ее в малых хозяйствах и бытовом секторе. Главное достоинство конструкции — исключение прямых попаданий солнечных лучей на сырье, при этом нагрев происходит в основном за счет ИК-излучений и контактного теплообмена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mondal, A. K. A Brief History and Future Aspects in Automatic Cleaning Systems for Solar Photovoltaic Panels / A. K. Mondal, K. Bansal // Advanced Robot. 2015. Vol. 29, No 8. P. 515–524.
2. Deposition and Possible Influence of a Self-Cleaning Thin $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ Film on a Photovoltaic Module Efficiency / A. Soklič [et. al] // Catalysis Today. 2015. Vol. 252. P. 54–60.
3. Recent Developments in Multifunctional Coatings for Solar Panel Applications: a Review / Sayem Mozumder Mohammad [et al.] // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2019. Vol. 189. P. 75–102.
4. Aziz, F. Spray Coating Methods for Polymer Solar Cells Fabrication: a Review / F. Aziz, A. F. Ismail // Materials Science in Semiconductor Processing. 2015. Vol. 39. P. 416–425.

5. Tai, Q. Emerging Semitransparent Solar Cells: Materials and Device Design / Q. Tai, F. Yan // *Advanced Materials*. 2017. Vol. 29, No 34. P. 1700192.
6. Effect of Dust on the Transparent Cover of Solar Collectors / H. K. Elminir [et al.] // *Energy Conversion and Management*. 2006. Vol. 47, No 18. P. 3192–3203.
7. Coatings for Concentrating Solar Systems: a Review / C. Atkinson [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 45. P. 113–122.
8. Рахмонов, И. У. Математические модели и алгоритмы оптимального управления нагрузкой электропотребителей / И. У. Рахмонов, К. М. Реймов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 6. С. 528–535. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-528-535>.
9. Бабаев, Б. Дж. Разработка и исследование энергосистем на основе возобновляемых источников с фазопереходным аккумулярованием тепла / Б. Дж. Бабаев. Махачкала, 2016. 345 с.
10. Бекман, Г. Тепловое аккумулярование энергии: пер. с англ. / Г. Бекман, П. В. Гилли. М.: Мир, 1987. 272 с.
11. Братенков, В. Н. Теплоснабжение малых населенных пунктов / В. Н. Братенков, П. В. Хаванов, Л. Я. Веккер. М.: Стройиздат, 1988. 223 с.
12. Григорьев, В. А. Разработка аккумуляторов теплоты с зернистым теплоносителем и методы их расчета на основе математического моделирования / В. А. Григорьев. М., 2003. 147 с.
13. Даффи, Дж. Основы солнечной теплоэнергетики / Дж. Даффи, У. Бекман: пер. с англ. О. С. Попеля [и др.]. Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект», 2013. 888 с.
14. Солнечные и ветровые автономные энергоустановки с водородным накопителем / О. С. Попель [и др.] // *Перспективы энергетики*. 2006. Т. 10. С. 77–90.
15. Oshchepkov, M. Yu. Stratification in a Solar Tank Accumulator during Rapid Displacement of Hot Water / M. Yu. Oshchepkov, S. E. Frid, M. A. Kolobaev // *Applied Solar Energy*. 2015. Vol. 51, No 3. P. 177–182.
16. Олышанский, А. И. Экспериментальные исследования тепловлагообмена в процессе конвективной сушки тонких влажных материалов / А. И. Олышанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 6. С. 564–578.
17. Kolomiyets, Yu. G. Efficiency of Solar Energy Utilization for Water Heating on the Russian Federation Territory / Yu. G. Kolomiyets, O. S. Popel, S. E. Frid // *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*. 2009. No 6. P. 16–23.
18. Effectiveness and Prospects of Using Different Solar Water Heating Systems under the Climatic Conditions of the Russian Federation / S. E. Frid [et al.] // *Thermal Engineering*. 2011. Vol. 58, No 11. P. 910–916.
19. Polymeric Materials for Solar Thermal Applications / M. Kohl [et al.]. Weinheim: Wiley-VCH, 2012. <https://doi.org/10.1002/9783527659609>.
20. Meyer, J. P. The Cost Must be Cut / J. P. Meyer, J. Gesthuizen // *Sun Wind Energy*. 2014. No 3. P. 58–59.
21. Results of the Development of a Solar Accumulation-type Water Heater Made of Polymer and Composite Materials / O. S. Popel' [et al.] // *Thermal Engineering*. 2013. Vol. 60, No 4. P. 267–269.
22. Polyakov, A. F. Numerical Simulation of Temperature Stratification in an Accumulation Type Solar Water-Heating Installation / A. F. Polyakov, S. E. Frid // *High Temperature*. 2014. Vol. 52, No 3. P. 417–423.
23. Oshchepkov, M. Yu. Thermal Stratification in Storage Tanks of Integrated Collector Storage Solar Water Heaters / M. Yu. Oshchepkov, S. E. Frid // *Applied Solar Energy*. 2015. Vol. 51, No 1. P. 74–82.
24. Электроснабжение станции нагрева нефти в скважине от ветроэлектрической установки / А. А. Бельский [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 2. С. 146–154. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-146-154>.
25. Теплоустойчивость и тепломассообмен дорожных конструкций / Б. М. Хрусталев [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 6. С. 536–546. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-536-546>.
26. Smyth, M. Integrated Collector Storage Solar Water Heaters / M. Smyth, P. C. Eames, B. Norton // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2006. Vol. 10, No 6. P. 503–538.
27. Hendron, R. Development of Standartized Domestic Hot Water Event Schedules for Residential Buildings [Electronic Resource] / R. Hendron, J. Burch // *Proc. Energy Sustainability*

- Conf., Long Beach, CA. 2007. Pap. NREL/CP-55040874. Mode of access: <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/40874.pdf>.
28. Бабаев, Б. Д. Расчет энергетических характеристик процессов зарядки и разрядки аккумулятора на основе системы MgO-Mg(OH)_2 / Б. Д. Бабаев, В. Н. Данилин, А. М. Гасаналиев // Физико-химический анализ многокомпонентных систем: тез. докл. II Всерос. науч. конф. 2002 г. Махачкала: Изд-во ДГПУ (НИИ ОНХ), 2002. С. 27–28.
 29. Экологические основы использования возобновляющихся источников энергии / В. В. Волшаник [и др.] // Вестник МГСУ. 2010. Т. 2, № 4. С. 108–119.
 30. Simulation of Tandem Thin-Film Solar Cell on the Basis of CuInSe_2 / A. K. Esman [et al.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 5. С. 385–395. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-385-395>.
 31. Исмаишова, В. А. Возможности использования солнечной энергии для сушки фруктов и овощей / В. А. Исмаишова // Использование солнечной энергии: сборник. М., 1957. С. 232–247.
 32. Хазимов, К. М. Интенсификация процесса сушки продуктов растительного происхождения с использованием солнечной энергии / К. М. Хазимов. Алматы, 2015. 201 с.
 33. Design and Performance of an Air Collector for Industrial Croup Dehydration / P. W. Niles [et al.] // Solar Energy. 2012. Vol. 20, No 1. P. 19–23.
 34. Захидов, Р. А. Возобновляемая энергетика в начале XXI века и перспективы развития гелиотехники в Узбекистане / Р. А. Захидов, М. С. Саидов // Гелиотехника. 2009. № 1. С. 3–12.
 35. Голицын, М. В. Альтернативные энергоносители / М. В. Голицын, А. М. Голицын, Н. М. Пронина. М.: Наука, 2004. 159 с.
 36. Бутузов, В. А. Повышение эффективности систем теплоснабжения на основе возобновляемых источников энергии / В. А. Бутузов. Краснодар, 2004. 297 с.
 37. Modeling of the Unsteady Temperature Conditions of Solar Greenhouses with a Short-Term Water Heat Accumulator and its Experimental Testing / N. R. Avezova [et al.] // Applied Solar Energy. 2010. Vol. 46, No 1. P. 4–7.
 38. Ахатов, Ж. С. Численные расчеты теплотехнических параметров солнечной сушилки-парника / Ж. С. Ахатов, А. С. Халимов // Гелиотехника. 2015. № 2. С. 26–30.
 39. Солнечные технологии в Узбекистане: состояние, приоритеты и перспективы развития / А. А. Абдурахманов [и др.] // Гелиотехника. 2012. № 4. С. 23–31.
 40. Нефтепродукты информационный портал [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.vot-nn.ru/production/paraffin/>.
 41. Сафаров, Ж. Э. Программное обеспечение математических моделей технологии сушки лекарственных трав на гелиосушильной установке / Ж. Э. Сафаров, Г. Т. Дадаев // Агентство по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан. Свидетельство DGU 04385 от 17.05.2017.
 42. Method for the Primary Processing of Silkworm Cocoons (*Bombyx Mori*) / J. E. Safarov [et al.] // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2019. Vol. 9, No 1. P. 4562–4565. <https://doi.org/10.35940/ijitee.a5089.119119>.
 43. Method for Drying Fruits of Rose Hips / J. E. Safarov [et al.] // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2019. Vol. 9, No 1. P. 3765–3768. <https://doi.org/10.35940/ijitee.a4716.119119>.

Поступила 26.12.2018 Подписана в печать 11.03.2019 Опубликовано онлайн 31.03.2020

REFERENCES

1. Mondal A. K., Bansal K. (2015) A Brief History and Future Aspects in Automatic Cleaning Systems for Solar Photovoltaic Panels. *Advanced Robotics*, 29 (8), 515–524. <https://doi.org/10.1080/01691864.2014.996602>.
2. Soklič A., Tasbihi M., Kete M., Štangar U. L. (2015) Deposition and Possible Influence of a Self-Cleaning Thin $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ Film on a Photovoltaic Module Efficiency. *Catalysis Today*. 252, 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2014.10.021>.
3. Mohammad Sayem Mozumder, Abdel-Hamid Mourad I., Hifsa Pervez, Riham Surkatti (2019) Recent Developments in Multifunctional Coatings for Solar Panel Applications: a Review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 189, 75–102. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.09.015>.

4. Aziz F., Ismail A. F. (2015) Spray Coating Methods for Polymer Solar Cells Fabrication: A Review. *Materials Science in Semiconductor Processing*, (39), 416–425. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.05.019>.
5. Tai Q., Yan F. (2017) Emerging Semitransparent Solar Cells: Materials and Device Design. *Advanced Materials*, 29 (34), 1700192. <https://doi.org/10.1002/adma.201700192>.
6. Elminir H. K., Ghitass A. E., Hamid R. H., El-Hussainy F., Beheary M. M., Abdel-Moneim K. M. (2006) Effect of Dust on the Transparent Cover of Solar Collectors. *Energy Conversion and Management*, 47 (18), 3192–3203. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.02.014>.
7. Atkinson C., Sansom C. L., Almond H. J., Shaw C. P. (2015) Coatings for Concentrating Solar Systems – a Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (45), 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.015>.
8. Rakhmonov I. U., Reymov K. M. (2019) Mathematical Models and Algorithms of Optimal Load Management of Electricity Consumers. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (6), 528–535 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-528-535>.
9. Babaev B. J. (2016) *Development and Research of Energy Systems Based on Renewable Sources with Phase Transitional Heat Accumulation*. Maxachkala. 345 (in Russian).
10. Beckman G., Gilli P. V. (1984) *Thermal Energy Storage*. Springer. 230.
11. Bratenkov V. N., Khavanov P. V., Vesker L. Ya. (1988) *Heat Supply of Small Settlements*. Moscow, Stroiizdat Publ. 223 (in Russian).
12. Grigoriev V. A. (2003) *Development of Heat Accumulators with a Granular Coolant and Methods for their Calculation Based on Mathematical Modeling*. Moscow. 147 (in Russian).
13. Duffie J. A., Beckman W. A. (2013) *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons. 910. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>.
14. Popel' O. S., Frid S. E., Shpil'rain Je. Je., Izosimov D. B., Tumanov V. L. (2006) Solar and Wind Autonomous Power Plants with Hydrogen Storage. *Perspektivy Energetiki = Power Engineering Perspectives*, 10, 77–90 (in Russian).
15. Oshchepkov M. Yu., Frid S. E., Kolobaev M. A. (2015) Stratification in a Solar Tank Accumulator during Rapid Displacement of Hot Water. *Applied Solar Energy*, 51 (3), 177–182. <https://doi.org/10.3103/s0003701x15030093>.
16. Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V., Gusarov A. M. (2018) Experimental Studies of Heat and Moisture Exchange in the Process of Convective Drying of Thin Wet Materials. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6) 564–578 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-564-578>.
17. Kolomiyets Yu. G., Popel' O. S., Frid S. E. (2009) Efficiency of Solar Energy Utilization for Water Heating on the Russian Federation Territory. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, (6), 16–23.
18. Frid S. E., Kolomiets Yu. G., Sushnikova E. V., Yamuder V. F. (2011) Effectiveness and Prospects of Using Different Solar Water Heating Systems Under the Climatic Conditions of the Russian Federation. *Thermal Engineering*, 58 (11), 910–916. <https://doi.org/10.1134/s0040601511110061>.
19. Kohl M. M., Meir G., Papillon P., Wallner G. M., Saile S. (2012) *Polymeric Materials for Solar Thermal Applications*. Weinheim, Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527659609>.
20. Meyer J. P., Gesthuizen J. (2014) The Cost Must Be Cut. *Sun Wind Energy*, (3), 58–59.
21. Popel' O. S., Frid S. E., Mordynskii A. V., Suleimanov M. Zh., Arsatov A. V., Oshchepkov M. Yu. (2013) Results of the Development of a Solar Accumulation-type Water Heater Made of Polymer and Composite Materials. *Thermal Engineering*, 60 (4), 267–269. <https://doi.org/10.1134/s0040601513040101>.
22. Polyakov A. F., Frid S. E. (2014) Numerical Simulation of Temperature Stratification in an Accumulation Type Solar Water-Heating Installation. *High Temperature*, 52 (3), 417–423. <https://doi.org/10.1134/s0018151x14030225>.
23. Oshchepkov M. Yu., Frid S. E. (2015) Thermal Stratification in Storage Tanks of Integrated Collector Storage Solar Water Heaters. *Applied Solar Energy*, 51 (1), 74–82. <https://doi.org/10.3103/s0003701x15010107>.
24. Belsky A. A., Morenov V. A., Kupavykh K. S., Sandyga M. S. (2019) Wind Turbine Electrical Energy Supply System for Oil Well Heating. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 146–154 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-146-154>.

25. Khroustalev B. M., Tingguo Liu, Akeliev V. D., Zhongyu Li, Aliakseyeu Yu. G., Zankavich V. V. (2019) Heat Resistance and Heat-and-Mass Transfer in Road Pavements. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (6), 536–546 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-536-546>.
26. Smyth M., Eames P. C., Norton B. (2006) Integrated Collector Storage Solar Water Heaters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10 (6), 503–538. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.11.001>.
27. Hendron R., Burch J. (2007) Development of Standartized Domestic Hot Water Event Schedules for Residential Buildings. *Proc. Energy Sustainability Conf.*, Long Beach, CA. Pap. NREL/CP-55040874. Available at: <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/40874.pdf>.
28. Babaev B. D., Danilin V. N., Hasanaliyev A. M. (2002) Calculation of Energy Characteristics of Battery Charging and Discharging Processes Based on the MgO-Mg(OH)_2 System. *Fiziko-Khimicheskii Analiz Mnogokomponentnykh Sistem: Tezisy Dokladov II Vserossiiskoi Nauchnoi Konferentsii* [Physicochemical Analysis of Multicomponent Systems: Abstracts of the II All-Russian Scientific Conference]. Makhachkala, Publishing House of the DSPU (SRI ONH), 27–28 (in Russian).
29. Volshanik V. V., Peshnin A. G., Hamanjoda U., Schennikova G. N. (2010) Ecological Basis for the Use of Renewable Energy Sources. *Vestnik MGSU*, 2 (4), 108–119 (in Russian).
30. Esman A. K., Kuleshov V. K., Potachits V. A., Zykov G. L. (2018) Simulation of Tandem Thin-Film Solar Cell on the Basis of CuInSe_2 . *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (5), 385–395. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-385-395>.
31. Ismashyeva V. A. (1957) Possibilities of Using Solar Energy for Drying Fruits and Vegetables. *The Use of Solar Energy: Collection*. Moscow. 232–247 (in Russian).
32. Khazimov K. M. (2015) *Intensification of the Drying Process of Plant Products Using Solar Energy*. Almaty. 201 (in Russian).
33. Niles P. W., Carnegie E. J., Pohl J. G., Cherne J. M. (2012) Design and Performance of an Aircollector for Industrial Crop Dehydration. *Solar Energy*, 20 (1), 19–23. [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(78\)90136-6](https://doi.org/10.1016/0038-092x(78)90136-6).
34. Zakhidov R. A., Saidov M. S. (2009) Renewable Energy at the Beginning of the XXI Century and Prospects for the Development of Solar Technology in Uzbekistan. *Applied Solar Energy*, 45 (1), 1–6. <https://doi.org/10.3103/s0003701x09010010>.
35. Golitsyn M. V., Golitsyn A. M., Pronian N. M. (2004) *Alternative Energy Carriers*. Moscow: Nauka Publ. 159 (in Russian).
36. Butuzov V. A. (2004) *Increasing the Efficiency of Heating Systems Based on Renewable Energy Sources*. Krasnodar. 297 (in Russian).
37. Avezova N. R., Samiev K. A., Khaetov A. R., Nazarov I. M., Ergashev Z. Zh., Samiev M. O., Suleimanov Sh. I. (2010) Modeling of the Unsteady Temperature Conditions of Solar Greenhouses with a Short-Term Water Heat Accumulator and its Experimental Testing. *Applied Solar Energy*, 46 (1), 4–7. <https://doi.org/10.3103/s0003701x10010020>.
38. Akhatov Zh. S., Khalimov A. S. (2015) Numerical Calculations of the Thermal Parameters of a Solar Dryer-Hotbed. *Applied Solar Energy*, 51 (2), 107–111. <https://doi.org/10.3103/s0003701x15020024>.
39. Abdurakhmanov A. A., Zaynutdinova Kh. K., Mamatkosimov M. A., Payzullakhanov M. S., Saragoza G. (2012) Solar Technologies in Uzbekistan: State, Priorities and Development Prospects. *Applied Solar Energy*, 48 (2), 84–91. <https://doi.org/10.3103/s0003701x1202003x>.
40. *Petroleum Products Information Portal*. Available at: <http://www.vot-nn.ru/production/paraffin/>.
41. Safarov J. E., Dadaev G. T. (2017) Software of Mathematical Models of the Technology of Drying Medicinal Herbs on a Solar-Drying Installation. *Agency on Intellectual Property of the Republic of Uzbekistan. Certificate DGU 04385* (in Russian).
42. Safarov J. E., Sultanova Sh. A., Dadayev G. T., Samandarov D. I. (2019) Method for the Primary Processing of Silkworm Cocoons (*Bombyx Mori*). *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9 (1), 4562–4565. <https://doi.org/10.35940/ijitee.a5089.119119>.
43. Safarov J. E., Sultanova Sh. A., Dadayev G. T., Samandarov D. I. (2019) Method for Drying Fruits of Rose Hips. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9 (1), 3765–3768. <https://doi.org/10.35940/ijitee.a4716.119119>.