

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 68, № 4
2025

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

Учредитель

Белорусский национальный технический университет

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Гречихин Л. И. Вольт-амперные характеристики выпрямительных диодов металл – полупроводник. Ч. 2: Вольт-амперные характеристики диодов металл – полупроводник	291
Зализный Д. И., Селиверстов Г. И., Кроть Д. Г. Расчет температур в проводах низковольтных воздушных линий электропередачи	311
Косенко А. Д., Величко В. А., Косенко А. А. Система автоматизированной обработки результатов тепловизионной диагностики электрооборудования	324

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Янчук В. В., Романюк В. Н. Использование дымовых газов котла для абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов системы регенеративного подогрева подпиточной воды	343
Filimonova A. A., Vlasova A. Yu., Chichirova N. D., Kamaliev R. F., Karnitsky N. B. Development and Investigation of Hydrogen Sulfide Adsorbents From Natural Materials (Филимонова А. А., Власова А. Ю., Чичирова Н. Д., Камалиева, Р. Ф., Карницкий Н. Б. Разработка и исследование адсорбентов сероводорода из природных материалов)	353
Узаков Г. Н., Седнин В. А., Сафаров А. Б., Мамедов Р. А., Рахматов О. И. Моделирование и расчет параметров малой гелиотеплицы с целью повышения энергоэффективности	367

Главный редактор Александр Михайлович Маляревич

Редакционная коллегия

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

Ведущий научный редактор В. Н. Гурьянчик

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

Подписано к печати 31.07.2025. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,25. Уч.-изд. л. 9,31. Тираж экз.
Дата выхода в свет . 2024. Заказ .

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

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 38200000006896 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65

© Белорусский национальный технический университет, 2025

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

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 68, No 4
2025

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

Founder

Belarusian National Technical University

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

CONTENTS

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

Gretchikhin L. I. Volt-ampere Characteristics of Metal-semiconductor Rectifier Diodes. Part 2: Volt-ampere Characteristics of Metal-semiconductor diodes	291
Zalizny D. I., Seliverstov G.I., Krol D. G. Temperature Calculation in Wires of Low-Voltage Overhead Power Lines	311
Kosenko A. D., Velichko V. A., Kosenko A. A. The System for Automated Processing of the Results of Thermal Imaging Diagnostics of Electrical Equipment	324

HEAT POWER ENGINEERING

Yanchuk V. V., Romaniuk V. N. The Use of Boiler Flue Gases for Absorption Lithium Bromide Heat Pumps in the System of Regenerative Heating of Make-up Water	343
Filimonova A. A., Vlasova A. Yu., Chichirova N. D., Kamaliev R. F., Karnitsky N. B. Development and Investigation of Hydrogen Sulfide Adsorbents From Natural Materials	353
Uzakov G. N., Sednin V. A., Safarov A. B., Mamedov R. A., Rakhmatov O. I. Simulation and Calculation of Parameters of a Small Solar Greenhouse in Order to Increase its Energy Efficiency.	367

Editor-in-Chief Aliaksandr M. Maliarevich

Editorial Board

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

Lead Science Editor V. N. Guryanchyk

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

Passed for printing 31.07.2025. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 12,25.
An edition of copies. Date of publishing 2024. Order list .

ADDRESS

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

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

© Belarusian National Technical University, 2025

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-291-310>

УДК 53 (075.3)

Вольт-амперные характеристики выпрямительных диодов металл – полупроводник

Часть 2

Вольт-амперные характеристики диодов металл – полупроводник

Л. И. Гречихин¹⁾

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

Реферат. Вольт-амперные характеристики разных диодов и стабилитронов получены опытным путем и существенно отличаются от опыта к опыту. Как правильно обосновать причину таких отличий, неясно. В этой связи возникла проблема в разработке теоретических основ производства такого вида техники на достаточно обоснованной теоретической базе с учетом последних достижений в электротехнике и электронике. В результате рассмотрен процесс формирования токов проводимости и токов смещения в контакте металл – полупроводник. В качестве металла применен алюминий, а в качестве полупроводника – германий и кремний. При прямом приложенном внешнем напряжении разработана теория расчета вольт-амперных характеристик германиевого и кремниевого диодов. Показано, что энергия сродства атомов полупроводниковых материалов на катоде несколько возрастает вследствие связи отрицательных ионов с электрическими диполями атомов поверхностного слоя молекул алюминия внутри столбообразной пустоты и при этом формируется электрический ток проводимости путем движения электронов от катода к аноду. Концентрация электронов вследствие ионизации отрицательных ионов определяется не температурой непосредственно диода, а уменьшенной температурой электронного газа внутри алюминия вследствие преодоления контактной разности потенциалов на $p-n$ переходе. На аноде происходит последовательное накопление отрицательного заряда электронов, что определяет превращение тока проводимости в ток смещения, так как энергия электронов в этом случае не превышает энергию работы выхода из кристалла алюминия. При обратном приложенном напряжении величина энергии сродства отрицательных ионов атомов примеси у анода остается прежней вследствие ионизации отрицательных ионов с учетом возрастания температуры электронного газа на $p-n$ переходе с возникновением тока смещения. Электрический ток проводимости возникает с кристалла алюминия, выполняющего роль катода, внутри столбообразной пустоты вследствие термоавтоэлектронной эмиссии. Ток проводимости у анода превращается в ток смещения, который поступает во внешние электрические провода. Внутренние стенки столбообразной пустоты являются хорошим диэлектриком и поэтому хорошо проводят ток смещения внутри столбообразной пустоты. Ток проводимости в этом случае выполняет роль усилителя результирующего электрического тока.

Ключевые слова: диод, стабилитрон, вольт-амперная характеристика, ток проводимости, ток смещения, термоавтоэлектронная эмиссия, энергия сродства, работа выхода

Для цитирования: Гречихин, Л. И. Вольт-амперные характеристики выпрямительных диодов металл – полупроводник. Ч. 2: Вольт-амперные характеристики диодов металл – полупроводник / Л. И. Гречихин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 4. С. 291–310. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-291-310>

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

Volt-ampere Characteristics of Metal-semiconductor Rectifier Diodes

Part 2

Volt-ampere Characteristics of Metal-semiconductor Diodes

L. I. Gretchikhin¹⁾

¹⁾Educational Institution “Belarusian State Academy of Communication”

Abstract. The volt-ampere characteristics of different diodes and zener diodes are obtained experimentally, and they differ significantly from experience to experience. It is unclear how to properly substantiate the reason for such differences. In this regard, a problem arose in developing the theoretical foundations for the production of this type of equipment on a sufficiently sound theoretical basis, taking into account the latest advances in electrical engineering and electronics. As a consequence, the process of formation of conduction currents and displacement currents in a metal–semiconductor contact is considered. Aluminum was used as a metal, and germanium and silicon were used as a semiconductor. With a direct applied external voltage, a theory for calculating the volt-ampere characteristics of germanium and silicon diodes has been developed. It is shown that the affinity energy of atoms of semi-conductor materials at the cathode increases slightly due to the coupling of negative ions with electric dipoles of atoms of the surface layer of aluminum molecules inside a columnar void, and an electric conduction current is formed by the movement of electrons from the cathode to the anode. The electron concentration due to the ionization of negative ions is determined not by the temperature of the diode itself, but by the reduced temperature of the electron gas inside the aluminum due to overcoming the contact potential difference at the p - n junction. A sequential accumulation of negative electron charge occurs at the anode, which determines the conversion of the conduction current into a displacement current, since the electron energy in this case does not exceed the energy of the aluminum work function of the crystal. At the reverse applied voltage, the affinity energy of the negative ions of the impurity atoms at the anode remains the same due to the ionization of the negative ions, taking into account an increase in the temperature of the electron gas at the p - n junction with an increase in the displacement current. An electric conduction current arises from an aluminum crystal acting as a cathode inside a columnar void due to thermoautoelectronic emission. The conduction current at the anode is converted into a displacement current, which enters the external electrical wires. The inner walls of the columnar void are a good dielectric and therefore they sufficiently conduct displacement current inside the columnar void. The conduction current in this case acts as an amplifier of the resulting electric current.

Keywords: diode, zener diode, volt-ampere characteristic, conduction current, displacement current, thermoautoelectronic emission, affinity energy, work function

For citation: Gretchikhin L. I. (2025) Volt-ampere Characteristics of Metal-semiconductor Rectifier Diodes. Part 2: Volt-ampere Characteristics of Metal-semiconductor Diodes. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (4), 291–310. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-291-310> (in Russian)

Введение

Основной характеристикой выпрямительных диодов и стабилитронов является вольт-амперная характеристика (ВАХ), которая отражает зависимость электрического тока анода I_a от величины приложенного напряжения между катодом и анодом U_{a-k} и определяется зависимостью $I_a = f(U_{a-k})$. Для анализа работы диодов с термоэмиссионным катодом проблем нет. Автоэлектронная эмиссия хорошо разработана, и вольт-амперные характе-

ристики в этом случае теоретически представляются формулой Гречихина [1]. Реально в полупроводниковых германиевых и кремниевых диодах ситуация достаточно запутанная и сложная. Попытки как-то качественно обосновать, каким образом формируется $p-n$ переход в этих диодах, подробно рассмотрено в работах [2–4]. Вольт-амперные характеристики, полученные опытным путем, существенно отличались от диода к диоду. Поэтому вольт-амперные характеристики полупроводниковых диодов представляли чисто качественно. В качестве примера на рис. 1 показана такая вольт-амперная характеристика без указания конкретных значений выполненных измерений.

При таком представлении вольт-амперной характеристики невозможно понять физику работы диода на основе металл – полупроводник даже качественно. Как правило, при изучении вольт-амперных характеристик использовались диоды промышленного изготовления без тщательного анализа технологии их производства. Поэтому получали результаты для диодов разных изготовителей и для одной и той же изготовленной партии. В этой связи на рис. 1 приведен обобщенный результат для многих диодов. Кроме этого, электрический ток измерялся во внешней электрической цепи, а то, как формировался электрический ток внутри диода, оставалось вне поля зрения, а само определение электрического тока не соответствовало определению тока, данному еще Максвеллом.

Максвелл, анализируя все законы электромагнетизма, полученные опытным путем, представил математически в обобщенном виде. На этой основе стало ясно, что в природе существуют только два вида электрических токов: ток проводимости и ток смещения. В совокупности эти токи определяются законом полного тока. Оба этих тока переносят энергию, которая определяется законом Джоуля – Ленца. Механизм переноса энергии этими токами разный [5]. В токе проводимости перенос энергии определяется движением свободных электрических зарядов, а в токе смещения – изменением электрического поля, т. е. вектором Умова – Пойнтинга.

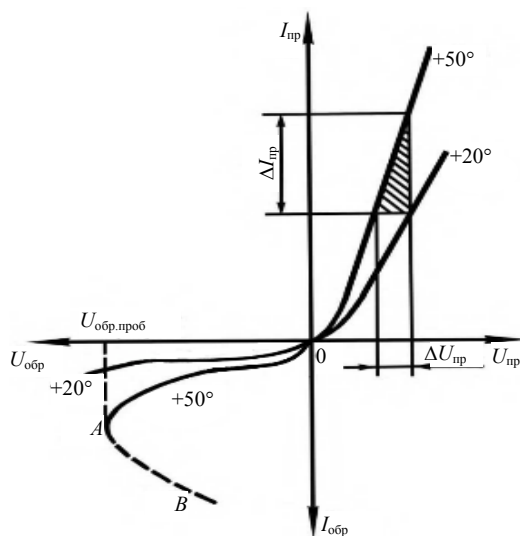


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика диода металл – полупроводник при прямом и обратном приложенном напряжении в качественном представлении

Fig. 1. Volt-ampere characteristic of a metal-semiconductor diode at direct and reverse applied voltage in a qualitative view

Полученные экспериментально вольт-амперные характеристики пытались аппроксимировать разными функциями, т. е. создавались эмпирические зависимости. Все попытки создать теорию вольт-амперных характеристик в соответствии с экспериментом не увенчались успехом. В общем случае электрический ток для движущихся свободных электронов определяется по формуле [5]

$$I = en_e v_e S. \quad (1)$$

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

Общая площадь электродов, применяемых в электронике, составляет не более 100×100 мкм² [3, 4]. Электрический ток, определяемый по формуле (1), Максвелл определил как ток проводимости. Все величины, входящие в (1), кроме заряда электрона и площади, по которой распространяется электрический ток, неясно, как определять.

Аналогичная ситуация имеет место и для движения положительно заряженных дырок. Положительно заряженные дырки создаются положительно заряженными ионами кристаллической решетки, которые внутри кристалла покоятся и совершают движение, создавая электрический ток, не в состоянии. Поэтому для положительно заряженных дырок формула (1) не применима в принципе.

В контакте металл – полупроводник с возникновением p – n перехода ситуация более сложная и запутанная. Это хорошо видно из вольт-амперных характеристик, измеренных экспериментально для специально изготовленных диодов, которые приведены на рис. 2¹ [3]. Из вольт-амперных характеристик многое непонятно. Почему возникают такие сложные зависимости? При постоянном приложенном напряжении электрический ток очень быстро возрастает, а при обратном приложенном напряжении возникает область линейной зависимости электрического тока от приложенного напряжения. В кремниевом диоде с ростом приложенного обратного напряжения тангенс угла наклона несколько возрастает при увеличении температуры, а в германиевом диоде остается постоянным и равен нулю. Такую странную зависимость электрического тока от приложенного обратного напряжения невозможно даже качественно объяснить с позиций возникновения p - и n -проводимости в контакте металл – полупроводник.

Кроме этого, почему для кремниевого и германиевого диодов при прямом одинаковом напряжении электрический ток отличается на порядок, а при подаче обратного напряжения вольт-амперные характеристики существенно изменяются?

¹ В данном случае измерения ВАХ были выполнены на специально изготовленных диодах. Во многих случаях ВАХ измеряют для конкретных диодов, выпускаемых промышленностью. То, как влияет технология изготовления на ВАХ, остается неясным.

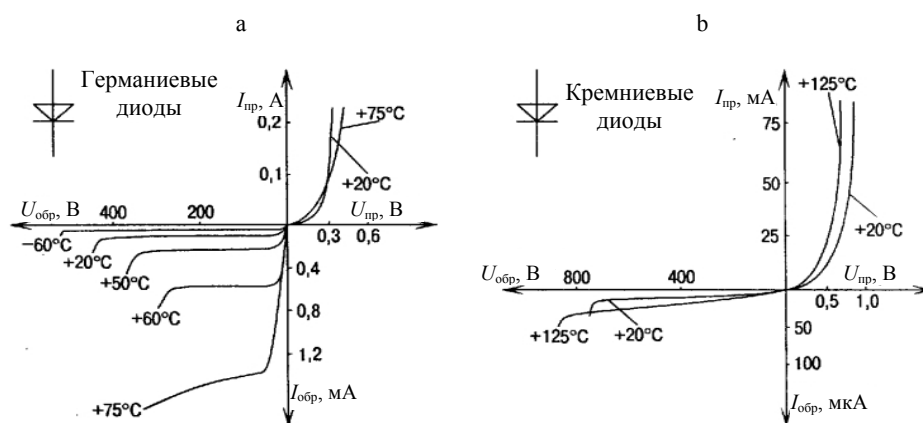


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики диода: а – германиевого; б – кремниевого

Fig. 2. Volt-ampere characteristics of a – germanium diode; b – silicon diode

При обратном приложенном напряжении для германиевого диода с ростом температуры максимальные подаваемые напряжения разнятся весьма существенно. Для кремниевого диода все наоборот: с ростом температуры подаваемое обратное напряжение возрастает. Еще интересный факт. Заканчивается вольт-амперная характеристика для германиевого диода экспоненциальным ростом тока проводимости, который увеличивается с повышением температуры, а для кремниевого диода этот рост незначительный и практически постоянный для разных температур. Все это настолько парадоксально, что наши представления о работе кремниевых и германиевых диодов остаются на уровне интуиции каждого производителя этого вида техники.

В этой связи возникла цель: рассмотреть контакт металл – полупроводник с позиций образования отрицательных ионов атомов и молекул металла, легированных полупроводником.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить вольт-амперные характеристики на границе перехода металл – германий и металл – кремний при прямом приложенном напряжении;
- определить вольт-амперные характеристики на границе перехода металл – полупроводник при обратном приложенном напряжении.

Основная часть

Вольт-амперные характеристики германия и кремния на основе алюминия при прямом приложенном напряжении. Вольт-амперные характеристики германиевых и кремниевых диодов, приведенные на рис. 2, качественно объясняют на основе образования $p-n$ перехода. Произвести конкретный количественный расчет полученных зависимостей с теоретическим обоснованием оказалось достаточно сложной задачей. Возникла

необходимость в создании теории формирования вольт-амперных характеристик на строго обоснованной теоретической базе, развитой в работах [6–8]. В этой связи ионизация отрицательных ионов у анода или у катода позволяет определять величину тока проводимости.

Электроны тока проводимости внутри столбообразной пустоты на поверхности анода останавливаются и внутрь кристалла не проникают, так как не в состоянии преодолеть работу выхода кристалла алюминия 4,25 эВ [9]. Свободные электроны на поверхности кристалла алюминия создают электрическое поле, которое направлено нормально к поверхности кристалла. Под действием такого поля формируется ток смещения, в котором возникают колебания нормальной и тангенциальной составляющей напряженности электрического поля с равной амплитудой.

В стационарных условиях протекания тока проводимости в $p-n$ переходе при внешнем прямом приложенном напряжении колебания электрического тока проводимости не происходит, а поэтому током смещения можно пренебречь. При определении вольт-амперной характеристики электрический ток измеряется во внешней замкнутой цепи, в которой реализуется только ток смещения [5]. На этой основе разработано программное обеспечение и произведен расчет токов смещения в зависимости от приложенного прямого внешнего электрического напряжения с использованием исходных данных, которые сведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения радиусов атомов в кристалле, молекуле и свободных атомах, а также сродства к электрону и встроенного атомного электрического момента в атомах [9–11]

The values of the radii of atoms in a crystal, molecule, and free atoms, as well as of the electron affinity and of the built-in atomic electric moment in atoms [9–11]

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

Результаты расчета вольт-амперной характеристики германиевого диода приведены на рис. 3. Теоретический расчет ВАХ в пределах порядка величины достаточно удовлетворительно совпадает с экспериментальными данными, которые приведены на рис. 2а. Можно подобрать условия, когда произойдет полное совпадение с экспериментальной зависимостью.

Для германиевого диода с учетом взаимодействия электрона отрицательного иона с электрическими диполями атомов и молекул алюминия, а также молекул примеси в столбообразной пустоте и уменьшения температуры электронного газа вследствие преодоления контактной разности потенциалов металл – полупроводник на 40 К реализуется полное совпадение теоретической ВАХ с экспериментальной ВАХ. При температуре диода 75 °С совпадение теоретической и экспериментальной ВАХ возникает в условиях, приведенных на рис. 3, а в зоне контакта металл – полупроводник вследствие преодоления контактной разности потенциалов падение температуры электронного газа происходит внутри металла почти на 23 °С. Можно подобрать условия, когда произойдет полное совпадение с экспериментальной зависимостью. Если для германиевого диода учесть взаимодействия электронов отрицательных ионов с электрическими диполями атомов, формирующих внутреннюю поверхность столбообразной пустоты, то начиная с критического напряжения ($U \sim 0,364$ В) происходит резкое возрастание электрического тока диода.

Теоретический расчет ВАХ кремниевого диода выполнен в условиях, когда происходит взаимодействие электронов отрицательных ионов с электронным облаком кристалла алюминия при наличии двух слоев молекул примеси вокруг столбообразных пустот. Результаты расчета представлены на рис. 4. Полученные зависимости по своему виду полностью совпадают с экспериментальными ВАХ (рис. 2b).

Сравнивая связь свободного электрона с атомом кремния при критическом напряжении 0,8 В, обнаружим, что падение температуры электронного газа в контакте алюминий – кремний по сравнению с температурой диода 20 °С происходит не более чем на 1 °С. При температуре диода 125 °С такое возрастание температуры электронного газа в контакте алюминий – кремний составляет уже 165,5 °С. В этом случае теория позволяет определить критическое прямое напряжение, которое возникает в контакте ме-

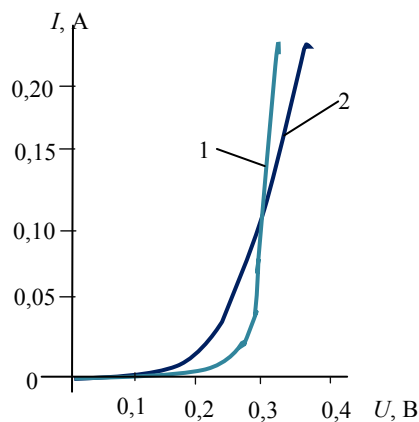


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика германиевого диода для активной площади диода 100×100 мкм² с напылением одного мономолекулярного слоя германия: 1 – $T = 20$ °С для критического нормального напряжения 0,364 В при температуре электронного газа 254 К; 2 – 75 °С для критического нормального напряжения 0,4 В при температуре электронного газа 325 К

Fig. 3. Volt-ampere characteristic of a germanium diode for an active diode area of 100×100 microns with a single monomolecular layer of germanium deposition: 1 – $T = 20$ °С for a critical normal voltage of 0.364 V at an electron gas temperature of 254 K; 2 – $T = 75$ °С for a critical normal voltage of 0.4 V at an electron gas temperature of 325 K

талл – полупроводник. В результате падение напряжения на контакте уменьшилось с 0,809 до 0,667 В. Падение напряжения 0,667 В на контакте алюминий – кремний было получено экспериментально (рис. 2b).

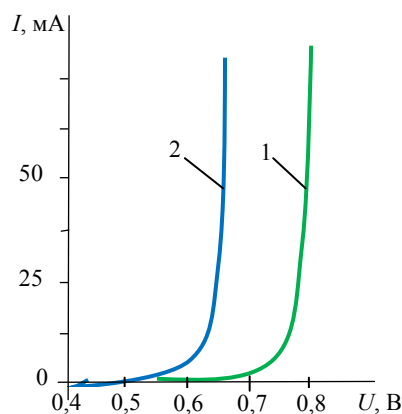


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика кремниевого диода для активной площади диода $100 \times 100 \text{ мкм}^2$ с напылением одного мономолекулярного слоя примеси ($n=2$): 1 – при $T = 20 \text{ °C}$; 2 – 125 °C

Fig. 4. Volt-ampere characteristic of a silicon diode for an active diode area of 100×100 microns with deposition of one monomolecular impurity layer ($n=2$): 1 – at $T = 20 \text{ °C}$; 2 – at $T = 125 \text{ °C}$

Вольт-амперные характеристики германия и кремния при обратном приложенном напряжении. При обратном приложенном напряжении контакты меняются на обратные. Катод превращается в анод, а анод – в катод. Электрический ток проводимости возникает только в столбообразной пустоте вследствие движения свободных электронов. Источником свободных электронов у анода являются отрицательные ионы примесей, а у катода – электроны внутри кристалла алюминия. Столбообразная пустота по распределению электрических зарядов трансформируется и представлена на рис. 5.

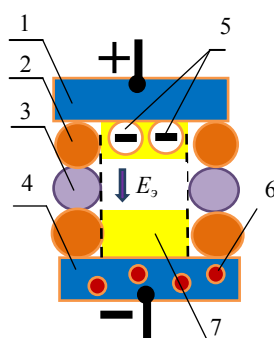


Рис. 5. Элемент столбообразной пустоты: 1 – анод; 2 – молекула алюминия; 3 – молекула примеси; 4 – катод; 5 – отрицательные ионы атомов примеси; 6 – электроны в кристалле алюминия; 7 – столбообразная пустота между катодом и анодом

Fig. 5. Columnar void element: 1 – anode; 2 – aluminum molecule; 3 – impurity molecule; 4 – cathode; 5 – negative ions of impurity atoms; 6 – electrons in an aluminum crystal; 7 – a columnar void between the cathode and the anode

При наложении обратного напряжения структура расположения атомов примеси и поверхность алюминия остались прежними. Изменилось только направление воздействия внешнего приложенного поля. В этом случае 9 атомов примеси в столбообразной пустоте расположены у анода. Эти атомы пребывают в виде заряженного слоя отрицательных ионов. Электрически заряженный слой из отрицательно заряженных ионов полупроводника под воздействием приложенного электрического поля и темпера-

туры ионизируется и поставляет в окружающую среду свободные электроны. Эти свободные электроны проникнуть в кристалл алюминия и создавать ток проводимости не могут, так как их энергия направленного движения не в состоянии преодолеть работу выхода электронов из кристалла алюминия, как это показано на рис. 5.

Связанные электроны внешнее электрическое поле не создают. Такое поле создают только свободные электроны. Однако электрическое поле, которое они формируют, проникает на глубину двойного электрического слоя с максимумом на поверхности кристалла и минимумом на слое положительных ионов внутри кристалла. Трехатомные молекулы в центре обладают электрическим зарядом разного знака в равных количествах [12, 13]. Величины этих зарядов приведены в табл. 1.

Поэтому в твердом теле трехатомные молекулы взаимодействуют парно. На рис. 6а это хорошо видно. Когда соприкасаются две отполированные металлические поверхности, включается взаимодействие трехатомных молекул разных электрических знаков. Если такой контакт поместить во внешнее электрическое поле, то возникнет поляризация и произойдет разделение зарядов разных знаков. В этом случае взаимодействие трехатомных молекул заметно ослабится.

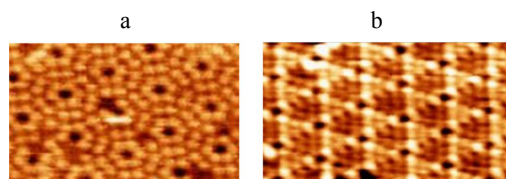


Рис. 6. Деформация поверхности кремния (111) под действием внешнего электрического поля при разных напряжениях на образце: а – $U_s = +2,0$ В; б – $U_s = -2,0$ В [20]

Fig. 6. Deformation of the silicon surface (111) under the influence of an external electric field at different voltages on the sample: а – $U_s = +2.0$ V; б – $U_s = -2.0$ V [20]

Туннельным микроскопом установлено [14, 15], что при подаваемом напряжении ~ 2 В происходит разделение зарядов трехатомных молекул разных знаков вокруг столбообразных пустот. Экспериментально это хорошо видно на рис. 6. На рис. 6а трехатомные молекулы кремния с положительным зарядом в центре внешним полем вдавливаются внутрь твердого тела, а с отрицательным зарядом в центре приложенное внешнее поле не в состоянии преодолеть энергию связи таких молекул с положительным остовом основного кристалла. Поэтому деформация поверхности отсутствует. При отрицательном напряжении положительно заряженные молекулы на поверхности кремния вытягиваются с поверхности, так как они с остовом кристалла связаны незначительно [16, 17]. Это хорошо видно на рис. 6б. В случае контакта двух плоскостей из трехатомных молекул внешнее приложенное напряжение будет смещать эти поверхности друг относительно друга. Такое смещение на основании рис. 5 определяется следующим образом:

$$\Delta r = \frac{2W}{eE_3}, \quad (2)$$

$$\text{где } W = W_0 \left(1 - \frac{eE_3 r_{a,b}}{\varepsilon_r W_0} \right) \exp \left[-\frac{W_0 \left(1 - \frac{eE_3 r_{a,b}}{\varepsilon_r W_0} \right)}{k_b T_e} \right], \quad W_0 - \text{начальная энергия}$$

связи трехатомных молекул в контакте и определяется кулоновским, электрон-дипольным и диполь-дипольным взаимодействием молекул при их контакте; E_3 – внешняя напряженность электрического поля; T_e – температура электронного газа после прохождения p – n перехода; $r_{a,b}$ – расстояние между центрами контактирующих молекул. Для взаимодействия трехатомных молекул относительная диэлектрическая проницаемость вокруг столбообразной пустоты

$$\varepsilon_r = \frac{3^2 n_{Al} p_{3,1} p_{3,2}}{3 \varepsilon_0 k_b T}. \quad (3)$$

Используя данные табл. 1, при контакте молекул алюминия и германия $W_0 = 0,0832$ эВ, при контакте алюминия и кремния $W_0 = 0,172$ эВ, при контакте кремния с кремнием $W_0 = 0,381$ эВ. Относительная диэлектрическая проницаемость контакта алюминий – германий $\varepsilon_r = 7,67$. Для контакта алюминий – кремний $\varepsilon_r = 14,7$, для контакта кремний – кремний $\varepsilon_r = 29,5$. Падение напряжения последовательно на этих контактах составит: 0,806, 1,67 и 3,69 В. Следовательно, внутренняя поверхность столбообразных пустот является хорошим диэлектриком, по которому могут распространяться электромагнитные волны и создавать ток смещения.

Для германиевого диода это два контакта металл – полупроводник, а для кремниевого диода три контакта: два металл – полупроводник и один полупроводник – полупроводник. В результате для кремниевого диода подаваемые обратные напряжения должны быть больше, чем для германиевого, что было установлено экспериментально (рис. 2). При температуре 20 °С подаваемые обратные напряжения для кремниевого диода почти в два раза больше, чем для германиевого.

При обратном приложенном электрическом напряжении свободные электрические заряды в столбообразной пустоте возникают у поверхности анода и катода. Непосредственно с поверхности кристалла алюминия у катода под действием приложенного внешнего поля и температуры диода могут возникать свободные электроны вследствие преодоления работы выхода и создавать ток проводимости внутри столбообразной пустоты. У анода свободные электроны возникают вследствие ионизации отрицательных ионов также под действием температуры и приложенного электрического поля. Однако движение этих электронов не происходит, но их поверхностная концентрация создает электрическое поле, которое пронизывает двойной электрический слой, образованный на поверхности кристалла алюминия в столбообразной пустоте.

Возникновение тангенциальной составляющей электрического поля в двойном электрическом слое кристалла алюминия приводит к формированию тока смещения. Преодоление двойного электрического слоя свободными электронами между отрицательными ионами примесей и двойным электрическим слоем кристалла алюминия не происходит, так как их энергия значительно меньше работы выхода кристалла алюминия.

При обратном напряжении у катода свободные электроны возникают вследствие термоавтоэлектронной эмиссии с преодолением работы выхода электронов из кристалла алюминия. В результате у катода формируется ток проводимости. При этом свободные электроны преодолевают энергию работы выхода, которая для поликристалла алюминия равна 4,25 эВ [9]. Контакт молекул германия и кремния возникает с кристаллом алюминия только в столбообразных пустотах. Наложение обратного внешнего электрического поля приводит к возникновению тока проводимости у катода с учетом того, что образование свободных электронов для германия происходит вследствие преодоления энергии выхода электрона из металла алюминия. Как для германия, так и для кремния общая энергия, которую должен преодолеть электрон, составит

$$W = 4,25 + 1,687 = 5,937 \text{ эВ.} \quad (4)$$

Чтобы такую энергию реализовать на контакте металл – полупроводник, необходимо подать между катодом и анодом напряжение значительно большей величины. Во сколько раз необходимо увеличить внешнее напряжение по сравнению с необходимым для преодоления внутренних энергетических связей, определяется величиной

$$N = \frac{k_1 (d_{Al} + \Delta d_1) + k_2 (d_p + \Delta d_2)}{r_a}, \quad (5)$$

где k_1 и k_2 – соответственно число слоев молекул алюминия и молекул примеси, формирующих столбообразную пустоту; d_{Al} и d_p – диаметры молекул алюминия и примеси; Δd_1 и Δd_2 – температурное расширение между взаимодействующими молекулами вокруг столбообразной пустоты. Кроме этого, необходимо учитывать вероятность несовпадения столбообразных пустот анода и катода, а также то, что свободные электроны в контакте металл – полупроводник вследствие ионизации отрицательных ионов могут накапливаться и создавать отрицательно заряженную плоскость, которую электронам проводимости необходимо преодолевать. Все эти три процесса определяют, во сколько раз необходимо увеличивать подаваемое напряжение, чтобы происходила эффективная ионизация отрицательных ионов.

Энергетические схемы при напылении германия или кремния на поверхность алюминия с обратным приложенным напряжением показаны на рис. 7. Рис. 7 отличается от рис. 5 тем, что на рис. 5 показана конструкция расположения атомов, а на рис. 7 – схемы расположения энергий ионизации отрицательных ионов атомов примеси относительно энергетической структуры кристалла алюминия.

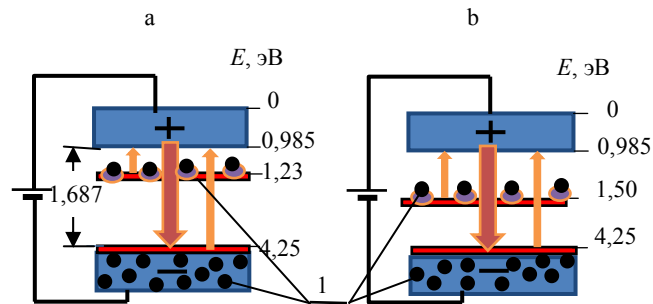


Рис. 7. Энергетическая схема в столбообразной пустоте при напылении на поверхность алюминия (111): а – германия; б – кремния; 1 – связанные электроны

Fig. 7. Energy pattern in a columnar void when aluminum (111) is sprayed onto the surface of: a – germanium; b – silicon; 1 – bound electrons

Из рис. 7 следует, что в диоде с контактом металл – полупроводник реализуются две области, из которых возможна эмиссия свободных электронов. Это ионизация отрицательных ионов у анода и эмиссия свободных электронов из металла с учетом распределения по энергиям Ферми – Дирака [17].

На основании рис. 7 результирующая энергия, которую связанный электрон должен преодолеть, чтобы стать свободным, в замкнутой электрической цепи у анода для германиевого диода $\Delta E_{g,i} = 1,23$ эВ, а для кремниевого диода $\Delta E_{g,i} = 1,50$ эВ. Приведенные значения есть энергии сродства атомов примеси. Область энергий до границы зоны проводимости кристалла алюминия изменяется под действием температуры и приложенного электрического поля, а в области энергий от смещенной границы зоны проводимости алюминия и до нуля воздействует только температура.

Свободные и связанные электроны на поверхности алюминия у анода находятся в динамическом равновесии, но при этом возникают колебания электрического поля, создаваемого свободными электронами. На поверхности металла совершаются колебания электрического поля с частотой, которая определена при распространении постоянного электрического поля. Для каждого кристалла эта величина постоянная и определяется его структурой. Возникновение тангенциальной составляющей электрического поля на поверхности кристалла алюминия в двойном электрическом слое приводит к возникновению во внешней электрической цепи электрического тока смещения.

Амплитуда падения напряженности электрического поля на поверхности кристалла у анода составит [18]

$$E_{\alpha,0} = \frac{\Delta\phi_k}{r_g}, \quad (6)$$

где r_g – радиус атома германия или кремния; $\Delta\phi_k$ – приложенное внешнее напряжение для преодоления энергии между отрицательным ионом и дном

зоны проводимости алюминия, равной для германия 2,019 В, а для кремния 5,528 В. При этих значениях для обратного внешнего приложенного электрического поля возникает ионизация отрицательных ионов у анода. Образующиеся свободные электроны у анода вследствие ионизации отрицательных ионов германия не могут преодолеть работу выхода кристалла алюминия и поэтому накапливаются на поверхности металла алюминия и создают тангенциальное электрическое поле. В результате внутри металла алюминия возникает электрический ток смещения, распространяющийся по поверхности подводящих проводов.

В кремниевом диоде ионизация отрицательных ионов кремния поставляет внутрь столбообразной пустоты свободные электроны с энергией, которая больше работы выхода электронов из металла алюминия. Такие электроны проникают внутрь металла, там остаются и не создают тока смещения. Поэтому в кремниевом диоде ток смещения возникает вследствие преодоления работы выхода из алюминия только из катода, а образующиеся свободные электроны вследствие ионизации отрицательных ионов кремния у анода поглощаются кристаллом алюминия и создают электрическое поле, которое ослабляет внешнее приложенное электрическое поле.

В германиевом диоде анод участвует в формировании электрического тока смещения, для которого

$$\Delta\varphi_k = 2,019 \frac{r_z}{d_k} = 2,168 \text{ В}, \quad (7)$$

где d_k – толщина двойного электрического слоя в аноде, равная радиусу атома в кристалле алюминия, значение которого приведено в табл. 1, а для кремния $\Delta\varphi_k = 5,625$ В. Это энергии свободных электронов, которые образуются вследствие ионизации отрицательных ионов германия и кремния. В случае германиевого диода энергии образующихся при ионизации отрицательных ионов недостаточно для преодоления работы выхода электронов из кристалла алюминия, и поэтому они на поверхности кристалла создают отрицательно заряженную плоскость, которая определяет ток смещения.

В кремниевом диоде образующиеся свободные электроны обладают энергией большей, чем работа выхода электронов из кристалла алюминия. При этом кристалл алюминия поглощает образующиеся электроны при ионизации отрицательных ионов кремния. В результате реализуется тангенциальное электрическое поле на границе металла – алюминия у анода, которое не формирует тока смещения, а создает электрическое поле внутри столбообразной пустоты, которое препятствует движению электронов тока проводимости от катода к аноду.

Передаваемый поток мощности электрическим током смещения определяется вектором Умова – Пойнтинга, который в данном случае определяется следующим образом [5]:

$$P = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_i^2. \quad (8)$$

Поверхностная концентрация свободных электронов вследствие ионизации отрицательных ионов у анода в столбообразной пустоте [18]

$$E_i = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}. \quad (9)$$

На основании рис. 7 поверхностная плотность электрических зарядов равна

$$\sigma = \frac{eN_a w}{\pi d_{Ge}^2}. \quad (10)$$

Здесь $N_a = 3 + 6(1 - \theta)$ – полное количество атомов примеси в столбообразной пустоте; w – вероятность ионизации отрицательных ионов атомов примеси, которая равна

$$W = \left(1 - \frac{\Delta\phi}{E_{A,Ge}}\right) \exp\left[-\frac{E_{a,Ge}}{k_b T_e} \left(1 - \frac{\Delta\phi}{E_{A,Ge}}\right)\right]. \quad (11)$$

В этом уравнении T_e является температурой электронного газа после прохождения p – n перехода.

Окончательно ток смещения

$$I_{bias} = \frac{PS_e}{\Delta\phi}. \quad (12)$$

Здесь $\Delta\phi = 2E_{\alpha,a}r_a$ – разность потенциалов, которая наводится на атомах примеси; S_e – общая площадь соприкосновения атомов примеси с кристаллом алюминия в столбообразных пустотах.

Электрический ток проводимости возникает только в столбообразных пустотах. Размер площади столбообразной пустоты для кристалла алюминия на основании рис. 5 и 7 с учетом разных радиусов молекул кремния и алюминия (табл. 1) $S_{Al} = 1,234 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$. Площадь столбообразной пустоты совместно с молекулярным окружением $S_0 = 6,048 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2$. Полная площадь соприкосновения $S_{e,1}$ при точечной технологии изготовления диодов находится по значению электроемкости

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S_{e,1}}{d}.$$

Отсюда для столбообразной пустоты $\epsilon_r = 1$, и тогда

$$S_{e,1} = \frac{C d}{\varepsilon_0}. \quad (13)$$

В формуле (13) размер величины d равен толщине двойного электрического слоя кристалла алюминия. Все величины в (13) определены, и площадь для емкости $C = 1 \cdot 10^{-12}$ Ф имеет значение $S_{e,1} \cong 1,617 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$.

Для кремниевого диода ток смещения вследствие ионизации отрицательных ионов кремния отсутствует. Возникает только электрический ток проводимости в столбообразных пустотах у катода. Кроме этого, следует учитывать, что при производстве кремниевых диодов применяется не точечная, а плоскостная сплавная технология, в которой электрическая емкость p – n перехода реализуется на порядок более, чем для точечной технологии. Тогда для плоского конденсатора емкостью 10 нФ общая площадь составит $S_{e,1} \cong 1,617 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$. Свободные электроны тока проводимости у анода тормозятся и создают переменное электрическое поле внутри кристалла алюминия. При этом происходит превращение электрического тока проводимости в ток смещения.

Окончательно общая площадь соприкосновения атомов примеси с кристаллом алюминия в столбообразных пустотах составит

$$S_e = \frac{S_{e,1}}{S_0} S_{Al}. \quad (14)$$

При выполнении расчетов ВАХ необходимо учитывать, что температура электронного газа при прохождении p – n перехода отлична от температуры корпуса диода. Она должна уменьшаться при прямом приложенном напряжении, и достаточно существенно. В этой связи проведем анализ экспериментальных данных, представленных на рис. 2а для германия, которые даны в табл. 2. В табл. 2 приведены данные электрических токов проводимости и смещения, экспериментально полученные и теоретически рассчитанные при разных температурах диода. Кроме этого, указаны значения уменьшения температуры электронного газа, при которых теоретический расчет совпадает с данными, полученными опытным путем.

Таблица 2

Токи смещения и проводимости в зависимости от температуры германиевого диода

Displacement and conduction currents depending on the temperature of the germanium diode

Параметр	Температура, °C				
	–60	+20	+50	+60	+75
I , мА, экспер.	0,043	0,100	0,22	0,56	1,32
I , мА, теор.	$1,015 \cdot 10^{-4}$	0,124	0,489	14,37	63,82
ΔT , °C	+13,47	–0,82	–25,14	–31,94	–36,20
I , мА, результ.	0,100	0,26	0,44	0,74	1,24
I , мА, провод.	0,057	0,144	0,22	0,18	–0,08

У катода величина плотности тока смещения, сформированная у анода в замкнутой цепи, проходит без изменения, но у границы катода под действием приложенного внешнего напряжения и температуры дополнительно возникает ток проводимости. При этом на выходе из катода внутри столбообразной пустоты плотность электрического тока проводимости определяется термоавтоэлектронной эмиссией по формуле [1, 19]

$$J_{con} = a \frac{2e}{d_{Al}^3} \sqrt{\frac{8k_b T_e}{\pi m_e}} \left(1 - \frac{W_p - \Delta W}{W_p} \right) \exp\left(\frac{W_p - \Delta W}{k_b T_e}\right) \exp\left(\frac{e0.987}{k_b T_e}\right). \quad (15)$$

Здесь $W_p = 4,25$ эВ; $\Delta W = eE_{\gamma,0}d_k$; d_k – толщина двойного электрического слоя, равная радиусу атома внутри кристалла алюминия (табл. 1).

Электрический ток проводимости определяется следующим образом:

$$I_{con} = J_{con} S_{eff}. \quad (16)$$

По формуле (16) определяется плотность тока проводимости внутри столбообразной пустоты. Поэтому у анода для германиевого диода дополнительно к току смещения добавляется ток проводимости. В стационарных условиях результирующий электрический ток в соответствии с законом полного тока равен сумме

$$I_{res} = I_{bias} + I_{con}. \quad (17)$$

В стационарных условиях увеличение тока смещения током проводимости компенсируется потерями результирующего тока смещения во внешней электрической цепи на основании закона Джоуля – Ленца.

Получается, что результирующий электрический ток при обратном приложенном напряжении в германиевом диоде определяется термоавтоэлектронной эмиссией как у анода, так и у катода. У катода возникает электронное облако, которое своим действием препятствует эмиссии электронов из катода, которое трудно учесть. Поэтому для германиевого диода ток проводимости был определен как разность результирующего электрического тока и тока смещения, полученного теоретически. У катода электрический ток проводимости переходит в ток смещения у анода. Так как на границе кристалла алюминия ток проводимости полностью переходит в ток смещения, на поверхности кристалла не накапливаются электроны у анода и не создают дополнительного электрического поля, которое должно уменьшать поток движения электронов от катода к аноду².

В кремниевом диоде электрический ток формируется только у катода, создавая ток проводимости, а у анода ток проводимости превращается в ток смещения. Электроны, которые образуются у анода при ионизации отрицательных ионов кремния, проникают внутрь кристалла алюминия и на его поверхности возникает избыток электронов. Образующаяся заря-

² Ток смещения в этом случае представляет ТМ-волну, т. е. электрическую волну, которая распространяется в столбообразной пустоте, как по волноводу с диэлектрическими стенками.

женная плоскость создает электрическое поле, препятствующее движению электронов в столбообразной пустоте от катода к аноду.

По формулам (6)–(9) определяется напряженность электрического поля. Получены конкретные значения: при температуре 20 °С это $2,677 \cdot 10^7$ В/м, а при температуре 125 °С это $1,790 \cdot 10^8$ В/м. В вакууме такие значения напряженности электрического поля вполне допустимы.

Свободный электрон преодолевает энергию при движении от катода к аноду, равную

$$W_{Si} = eE_a h_s, \quad (18)$$

где E_a – напряженность электрического поля, создаваемая приложенным внешним обратным напряжением; $h_s = 2d_{Al} + 2d_{Si} + r_{Al}$.

В результате получаем $W_{Si} = 0,0292$ и $0,195$ эВ соответственно при температуре 20 и 125 °С.

Конкретный расчет напряжения, которое электрон преодолевает при движении от катода к аноду с учетом всех трех процессов, рассмотренных выше, при достаточно грубом определении вероятности стыковки столбообразных пустот катода и анода, для температуры 20 °С составило ~726 В, а для температуры 125 °С это ~806 В. Из вольт-амперных характеристик (рис. 2) эти значения примерно равны ~777 и ~889 В. Для германиевого диода с ростом температуры приложенное обратное внешнее напряжение уменьшается, а для кремниевого диода, наоборот, возрастает. Это подтверждается экспериментом (рис. 2). Получается, что для кремниевого диода ток смещения вследствие ионизации отрицательных ионов кремния отсутствует. Возникает только электрический ток проводимости в столбообразных пустотах у катода. Свободные электроны тока проводимости у анода тормозятся и создают переменное электрическое поле внутри кристалла алюминия. При этом происходит превращение электрического тока проводимости в ток смещения.

Плотность тока проводимости определяется по формуле (1), в которой уменьшение работы выхода из кристалла алюминия определяется своим значением напряженности электрического поля внутри столбообразной пустоты. При обратном приложенном напряжении с учетом возрастания напряженности электрического поля, формируемого у анода, получим

$$\Delta W = eE_{\gamma,0} r_{Al} + W_{Si}, \quad (19)$$

где $d_k = 2d_{Al} + 2d_{Si}$ и $E_{\gamma,0} = \frac{\Delta U}{dk}$. Здесь ΔU соответственно равно 777 и 889 В при температурах 20 и 125 °С.

Применение формулы (14) возможно до границы смещения энергии электронов внутри кристалла алюминия, которая удалена относительно нулевого значения на величину 0,987 эВ. В случае германиевого диода до энергий $W_p = 3,2922$ эВ реализуется термоавтоэлектронная эмиссия, а с энергий 1,0162 эВ возникает только термоэлектронная эмиссия, которая возрастает по экспоненте в зависимости от приложенного напряжения. Для кремниевого диода эти энергии соответственно равны 3,468 и 1,182 эВ.

Измерение электрического тока производится во внешней цепи, по проходам которой может протекать только ток смещения. Внутри столбооб-

разной пустоты кремниевого диода формируется только ток проводимости. На поверхности анода происходит превращение тока проводимости в ток смещения. В этой связи важно выяснить, как это происходит.

Внешнее электрическое поле создают только свободные электроны. У анода кремниевого диода свободные электроны возникают только вследствие ионизации отрицательных ионов. Энергия ионизации отрицательных ионов кремния у анода составит $\delta\phi = 0,987 + 0,195 - 1,5 = 0,318$ эВ. При ионизации отрицательных ионов с энергией 0,318 эВ будут возникать электроны с энергией 3,08 эВ. Такие электроны внутри кристалла алюминия проникать не в состоянии. В этих условиях ионизация атомов кремния на поверхности кристалла алюминия обеспечит превращение тока проводимости в ток смещения в контакте алюминий – кремний, и по внешней электрической цепи возникнет электрический ток смещения

$$J_{con} = a \frac{2e}{d_{Al}^3} \sqrt{\frac{8k_b T_e}{\pi m_e}} \exp\left(\frac{e0,318}{k_b T_e}\right) \frac{S_{e,1} S_{Al}}{S_0}. \quad (20)$$

На основании (20) электрический ток кремниевого диода соответственно при температуре 20 и 125 °С. составит $3,27 \cdot 10^{-5}$ и $1,15 \cdot 10^{-5}$ А. Из рис. 2 эти токи равны $3,75 \cdot 10^{-5}$ и $5,00 \cdot 10^{-5}$ А. Совпадение теоретических расчетов с экспериментом достаточно убедительное. Подгонки, которые неизбежно использовались, были вполне оправданы.

Таким образом, рассмотренная модель работы диодов на контакте металл – полупроводник достаточно сложная и запутанная. В отсутствие надежных экспериментальных данных, приведенных на рис. 2, предвидеть разработанную модель функционирования диода на контакте металл – полупроводник просто исключено.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ функционирования диодов и стабилитронов на основе контакта алюминий – германий и алюминий – кремний позволил установить следующее.

1. При прямом приложенном внешнем напряжении общим для вольт-амперных характеристик германиевого и кремниевого диодов является:

- преодоление величины энергии сродства отрицательных ионов атомов примеси у катода с возникновением тока проводимости внутри столбообразной пустоты;
- протекание электрического тока смещения по внутренней стенке столбообразной пустоты от анода к катоду;
- превращение тока проводимости в ток смещения у анода;
- увеличение изменения энергии сродства в процессе взаимодействия отрицательного иона с дипольными электрическими моментами атомов, формирующих внутренние стенки столбообразной пустоты;
- уменьшение температуры электронного газа в процессе преодоления контактной разности потенциалов p – n перехода.

2. При обратном приложенном напряжении общим для вольт-амперных характеристик германиевого и кремниевого диодов является следующее:

- ионизация отрицательных ионов у анода с превращением в ток смещения;
- термоавтоэлектронная эмиссия электронов с кристалла алюминия внутри столбообразной пустоты у катода с формированием тока проводимости внутри столбообразной пустоты и тока смещения по боковым стенкам столбообразной пустоты;
- увеличение изменения энергии сродства в процессе взаимодействия отрицательного иона с дипольными электрическими моментами атомов, формирующих внутренние стенки столбообразной пустоты;
- повышение температуры электронного газа в процессе прохождения контактной разности потенциалов p – n перехода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gretchikhin, L. I. Formation of Negative Ions on the Surface of a Solid Body and Their Influence on the Thermoelectronic and Autoelectronic Emission of Free Electrons / L. I. Gretchikhin // American Journal of Scientific Research. 2019. Vol. 5, No 3. P. 47–55. <https://doi.org/10.11648/j.ajasr.20190503.11>
2. Жеребцов, И. П. Основы электроники / И. П. Жеребцов. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
3. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника: учеб. для вузов / Ю. С. Забродин. М.: Альянс, 2013. 496 с.
4. Гладков, Л. Л. Физические основы электроники: учеб. пособие / Л. Л. Гладков, И. Р. Гулаков, А. Зеневич. Минск: Белорус. гос. академия связи, 2017. 227 с.
5. Гречихин, Л. И. Удельное электрическое сопротивление при токах проводимости и токах смещения / Л. И. Гречихин // Авиационный вестник. 2023. № 9. С. 10–21.
6. Gretchikhin, L. I. Formation of p -, n -Conductivity in Semiconductors / L. I. Gretchikhin // Military Technical Courier Scientific Periodical of the Ministry of Defence of the Republic of Serbia. 2018. Vol. 66, No 3. P. 304–321.
7. Гречихин, Л. И. Формирование p -, n -проводимости и p – n перехода / Л. И. Гречихин // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14, №5. С. 231–238.
8. Гречихин, Л. И. Формирование p - и n -проводимости отрицательными ионами / Л. И. Гречихин // Авиационный вестник. 2023. № 6. С. 8–16.
9. Физические величины: справ. / А. И. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский [и др.]; под ред. И. С. Григорьева, Е. Д. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
10. Радциг, А. А. Справочник по атомной и молекулярной физике / А. А. Радциг, Б. М. Смирнов. М.: Атомиздат, 1980. 240 с.
11. Gretchikhin, L. Built-in and Induced Electric Dipole Moments in Complex Atomic Systems and in the Diatomic Molecules / L. Gretchikhin // Авиационный вестник. 2020. No 2. P. 28–34.
12. Гречихин, Л. И. Аллотропия в металлах и ее влияние на работу теплового двигателя / Л. И. Гречихин, Н. Г. Куць // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний збірник наукових праць. Донецьк: ДонНТУ. 2011. Вип. 42. С. 83–89.
13. Гречихин, Л. И. Взаимодействие напыляемых частиц с поверхностью твердого тела / Л. И. Гречихин, Ю. Шмермбекк // Авиационный вестник. 2021. № 5. С. 21–28.
14. Исследования поверхностного слоя кремния с напылением индия / Л. И. Гречихин, Ю. Шмермбекк, Г. Ф. Лепин [и др.]. Берлин: Lambert. Academic Publishing, 2015. 80 с.
15. Binning, G. Scanning Tunneling Microscopy / G. Binning, H. Rohrer // Helv. Phys. Acta. 1982. Vol. 55, No 6. P. 726–735.
16. Кластерная структура кремния и конструкция его поверхности / Л. И. Гречихин, С. Д. Латушкина, В. М. Комаровская [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015, № 9. С. 5–10.
17. Гречихин, Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий. Общие основы, механические, тепловые и эмиссионные свойства / Л. И. Гречихин. Минск: Технопринт, 2004. 399 с.

18. Гречихин, Л. И. Физика. Электричество и магнетизм. Современная электродинамика / Л. И. Гречихин. Минск: Право и экономика, 2008. 302 с.
19. Эмиссионный портрет поверхности упрочняющего конструкционного материала / Ю. Шмермбекк, Д. Б. Мигас, А. И. Гутковский [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. № 3. С. 136–143.

Поступила 14.01.2025 Подписана в печать 18.03.2025 Опубликовано онлайн 31.07.2025

REFERENCES

1. Gretchikhin L. I. (2019) Formation of Negative Ions on the Surface of a Solid Body and Their Influence on the Thermoelectronic and Autoelectronic Emission of Free Electrons. *American Journal of Applied Scientific Research*, 5 (3), 47–55. <https://doi.org/10.11648/j.ajasr.20190503.11>.
2. Zherebtsov I. P. (1990) *Fundamentals of Electronics*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. 352 (in Russian).
3. Zabrodin Yu. S. (2013) *Industrial Electronics*. Moscow, Al'yans Publ. 496 (in Russian).
4. Gladkov L. L., Gulakov I. R., Zenevich A. (2017) *Physical Foundations of Electronics*. Minsk, Belarusian State Academy of Communications. 227 (in Russian).
5. Gretchikhin L. (2023) Specific Electrical Resistance at Conduction Currents and Displacement Currents. *The Aviation Herald*, (9), 10–21 (in Russian).
6. Gretchikhin L. I. (2018) Formation of p -, n -Conductivity in Semiconductors. *Vojnotehnički glasnik = Military Technical Courier*, 66 (3), 304–321.
7. Grechikhin L. I. (2018) The Formation of p -, n -Conductivity and p - n -Junction. *Uprochnyayushchie Technologii i Pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, 14 (5), 231–238. (in Russian).
8. Gretchikhin L. I. (2022) Formation of p - and n -conductivity by negative ions. *The Aviation Herald*, 2022, no. 6, pp. 8–16 (in Russian).
9. Babichev A. I., Babushkina N. A., Bratkovskii A. M., Brodov M. E., Bystrov M. V. (1991) *Physical Quantities: A Reference Book*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1232 (in Russian).
10. Radtsig A. A., Smirnov B. M. (1980) *Handbook of Atomic and Molecular Physics*. Moscow, Atomizdat Publ. 240 (in Russian).
11. Gretchikhin L. (2020) Built-in and Induced Electric Dipole Moments in Complex Atomic Systems and in the Diatomic Molecules. *The Aviation Herald*, (2), 28–34 (in Russian).
12. Grechikhin L. I., Kuts' N. G. (2011) Allotropy in Metals and its Influence on the Operation of a Heat Engine. *Progresivni tehnologii i sistemi mashinobuduvannya: Mizhnarodnii zbirnik naukovikh prats' [Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering: An International Collection of Scientific Papers]*. Donetsk, DonNTU, Issue 42, 83–89 (in Russian).
13. Gretchikhin L., Shmermbekk J. (2021) Interaction of Sprayed Particles with Surface Solid Body. *The Aviation Herald*, (5), 21–28 (in Russian).
14. Grechikhin L. I., Shmermbekk Yu. (2015) *Study of the Surface Layer of Silicon with Indium Deposition*. Berlin, Lambert. Academic Publishing. 80 (in Russian).
15. Binnig G., Rohrer H. (1982) Scanning Tunneling Microscopy. *Helvetica Physica Acta*, 55 (6), 726–735.
16. Gretchikhin L. I., Latushkina S. D., Komarovskaya V. M., Shmermbekk Yu. (2015) The Cluster Structure of Silicon and its Surface Construction. *Uprochnyayushchie Technologii i Pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, (9), 5–10 (in Russian).
17. Gretchikhin L. I. (2004) *Physics of Nanoparticles and Nanotechnology. General Principles, Mechanical, Thermal and Emission Properties*. Minsk, Technoprint Publ. 399 (in Russian).
18. Grechikhin L. I. (2008) *Physics. Electricity and Magnetism. Modern Electrodynamics*. Minsk, Pravo i Ekonomika Publ. 302 (in Russian).
19. Shmermbekk Yu., Migas D. B., Gutkovsky A. I., Gretchikhin L. I. (2020) Emission Portrait of Surface of Reinforcing Structural Material. *Uprochnyayushchie Technologii i Pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, (3), 136–143 (in Russian).

Received: 14 January 2025

Accepted: 18 March 2025

Published online: 31 July 2025

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-311-323>

УДК 621.3.052.3

Расчет температур в проводах низковольтных воздушных линий электропередачи

Д. И. Зализный¹⁾, Г. И. Селиверстов¹⁾, Д. Г. Кроль¹⁾

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

Реферат. Предложена методика расчета нестационарных тепловых процессов в проводах для низковольтных воздушных линий электропередачи. Методика основана на представлении провода как системы из нескольких однородных тел и решении дифференциальных уравнений, описывающих эту систему. Уравнения решены методом электротепловых аналогий на основе тепловой схемы замещения и операторного преобразования Лапласа. Приведены формулы для определения потерь мощности в проводе, тепловых сопротивлений и теплоемкостей провода. Особое внимание уделено расчету коэффициента теплоотдачи с поверхности провода. Разработаны алгоритмы расчета температур одно- и многожильных проводов при изменении влияющих внешних факторов. Показано, что расчет температур необходимо выполнять за несколько итераций. Введено понятие угла теплообмена, характеризующего часть поверхности провода, через которую идет теплообмен. Экспериментальные исследования для разных марок проводов при различных токах показали, что максимальная абсолютная погрешность расчетной температуры изоляции провода по отношению к измеренной составляет не более 6 °С. Для длительно допустимых токов проводов марки СИП-4 рассчитаны значения понижающих коэффициентов в зависимости от количества жил. Например, для провода СИП-4 4×16 допустимый ток должен быть не 100 А, как дается в справочниках, а 80 А при температуре окружающей среды 25 °С. Представленные в статье методики и алгоритмы расчета могут быть использованы для оценки пропускной способности низковольтных электрических сетей, а также на этапе проектирования систем электроснабжения.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, тепловой процесс, математическая модель, тепловая схема замещения, алгоритм, допустимый ток

Для цитирования: Зализный, Д. И. Расчет температур в проводах низковольтных воздушных линий электропередачи / Д. И. Зализный, Г. И. Селиверстов, Д. Г. Кроль // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 4. С. 311–323. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-311-323>

Temperature Calculation in Wires of Low-Voltage Overhead Power Lines

D. I. Zalizny¹⁾, G. I. Seliverstov¹⁾, D. G. Krol¹⁾

¹⁾Sukhoi State Technical University of Gomel

Abstract. A method for calculating non-stationary thermal processes in wires for low-voltage overhead power transmission lines is proposed. The technique is based on the representation

Адрес для переписки
Зализный Дмитрий Иванович
Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого
просп. Октября, 48
246746, г. Гомель, Республика Беларусь
Тел. +375 232 40-57-64
zaldmi@yandex.ru

Address for correspondence
Zalizny Dmitry I.
Sukhoi State Technical University of Gomel
48, Octiabria Ave.,
246746, Gomel, Republic of Belarus
Tel. +375 232 40-57-64
zaldmi@yandex.ru

of a wire as a system of several homogeneous bodies and the solution of differential equations describing this system. The equations are solved by the method of electrothermal analogies based on the thermal substitution circuit and the Laplace operator transformation. Formulas are given for determining the power losses in the wire, thermal resistances and heat capacities of the wire. Special attention is paid to calculating the coefficient of heat transfer from the surface of the wire. Algorithms for calculating the temperatures of single-core and multi-core wires when influencing external factors change have been developed. It is shown that the temperature calculation must be performed in several iterations. The concept of heat exchange angle is introduced, characterizing the part of the wire surface through which heat exchange takes place. Experimental studies for different brands of wires at different currents have shown that the maximum absolute error of the calculated insulation temperature of the wire relative to the measured temperature is no more than 6 °C. For the long-term allowable currents in the wires of the SIP-4 brand ('self-supporting insulated wires'), the values of the reduction coefficients are calculated depending on the number of cores. For example, for the SIP-4 4x16 wire, the permissible current should not be 100 A, as given in the directories, but 80 A at an ambient temperature of 25 °C. The calculation methods and algorithms presented in the article can be used to estimate the capacity of low-voltage electric networks, as well as at the design stage of power supply systems.

Keywords: overhead power line, thermal process, mathematical model, thermal substitution circuit, algorithm, permissible current

For citation: Zalizny D. I., Seliverstov G. I., Krol D. G. (2025) Temperature Calculation in Wires of Low-Voltage Overhead Power Lines. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (4), 311–323. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-311-323> (in Russian)

Введение

В последние годы в нашей стране наблюдается тенденция к увеличению электропотребления абонентами частного жилого сектора в городах и домов сельской жилой застройки. Электроснабжение таких потребителей в большинстве случаев осуществляется по воздушным линиям электропередачи (ЛЭП). Нагрузочная способность проводов этих линий ограничивается допустимой температурой их изоляции для изолированных проводов или допустимой температурой изоляторов, к которым они присоединены, для неизолированных проводов. Если провод покрыт изоляцией из сшитого полиэтилена, то длительно допустимая температура для него составляет 90 °C, а в остальных случаях она равна 70 °C.

Вопросы расчетов тепловых процессов в проводах низковольтных воздушных ЛЭП в литературе представлены слабо. Соответственно у специалистов проектных и эксплуатационных организаций зачастую возникают трудности с оценкой нагрузочной способности тех или иных марок проводов. Особенно это актуально для проводов марок СИП, длительно допустимые токи которых однозначно не прописаны в справочной литературе в зависимости от количества жил. Так, для проводов СИП с двумя и с четырьмя жилами в справочниках указываются одни и те же значения длительно допустимых токов, что неверно.

Цель представленных в статье исследований – разработка методики расчетов температур в проводах низковольтных воздушных ЛЭП и экспериментальное подтверждение этой методики.

Существующие методы расчета температур в проводах и кабелях

Математические тепловые модели проводов и силовых кабелей бывают двух видов: подробные, на основе сеточных методов, и упрощенные, на основе небольшого количества тепловых однородных тел.

Для подробных математических моделей используют мощные компьютерные программы типа ANSYS или Flux [1, 2], позволяющие анализировать тепловые поля вокруг и внутри кабелей. Однако эти программы требуют значительных вычислительных ресурсов, что ограничивает их применение для расчетов в рамках новых разрабатываемых программ.

В упрощенных математических моделях силовой кабель рассматривают как систему нескольких однородных тел [3–7]. Так, в [3] одножильный кабель представлен как система из четырех однородных тел: токоведущей жилы, основной изоляции, защитной оболочки и внутренней окружающей среды. При этом температура внутренней окружающей среды зависит от нагрева кабеля, а температура внешней окружающей среды не зависит.

Дифференциальные уравнения теплового равновесия, описывающие тепловые процессы в такой системе, записываются в виде:

$$\begin{cases} C_1 \cdot \frac{d\theta_1}{dt} + \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_1} = \Delta P; \\ C_2 \cdot \frac{d\theta_2}{dt} + \frac{\theta_2 - \theta_1}{R_1} + \frac{\theta_2 - \theta_3}{R_2} = 0; \\ C_3 \cdot \frac{d\theta_3}{dt} + \frac{\theta_3 - \theta_2}{R_2} + \frac{\theta_3 - \theta_4}{R_3} = 0; \\ C_4 \cdot \frac{d\theta_4}{dt} + \frac{\theta_4 - \theta_3}{R_3} + \frac{\theta_4 - \theta_5}{R_4} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\theta_1 - \theta_5$ – соответственно температуры однородных тел: токоведущей жилы, основной изоляции, защитной оболочки, внутренней и внешней окружающей сред, °C; $C_1 - C_4$ – теплоемкости соответствующих однородных тел, Вт·с/°C; $R_1 - R_4$ – тепловые сопротивления соответствующих однородных тел, °C/Вт; ΔP – потери активной мощности в токоведущей жиле, Вт.

На основе системы (1) можно синтезировать тепловую схему замещения кабеля, приведенную на рис. 1 и позволяющую вести расчет нестационарных тепловых процессов методами электротехники.

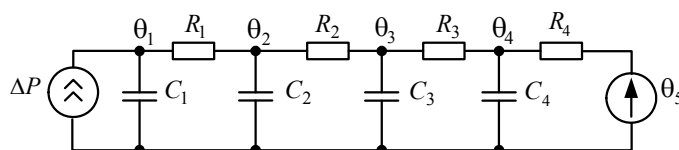


Рис. 1. Тепловая схема замещения одножильного силового кабеля

Fig. 1. Thermal replacement circuit of a single-core power cable

В [3] показано, что расчеты температур основных элементов одиночного одножильного силового кабеля, расположенного на воздухе, проведенные на основе схемы на рис. 1, дают максимальную абсолютную погрешность ± 4 °C по отношению к экспериментальным данным.

Расчеты остальных тепловых сопротивлений силовых кабелей регламентируются ГОСТ Р МЭК 60287-2-1–2009 (IEC 60287-2-1:1994) [8]. Провода воздушных ЛЭП в этом ГОСТ не рассматриваются.

Предлагаемая математическая модель тепловых процессов одножильного провода для воздушной ЛЭП

Моделирование тепловых процессов будем проводить по аналогии с методикой, изложенной в [3, 7] и ГОСТ [8].

Конструкция изолированного провода с одной жилой и тепловая схема замещения для него показаны на рис. 2.

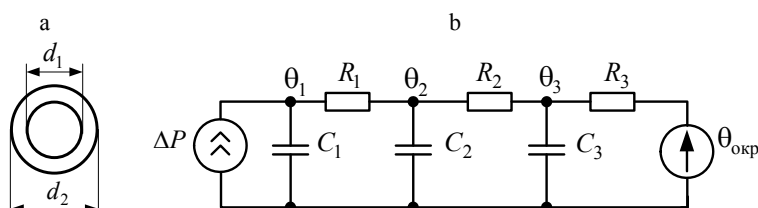


Рис. 2. Изолированный провод с одной жилой:
а – конструкция; б – тепловая схема замещения

Fig. 2. Insulated wire with one core:
a – construction; б – thermal replacement circuit

На рис. 2 обозначены величины: d_1 – диаметр жилы; d_2 – то же изоляции жилы; ΔP – потери активной мощности в жиле; R_1 – тепловое сопротивление жилы; R_2 – то же изоляции жилы; R_3 – то же внутренней окружающей среды; C_1 – теплоемкость жилы; C_2 – то же изоляции жилы; C_3 – то же окружающей среды; θ_1 – температура наиболее нагретой точки жилы; θ_2 – то же наиболее нагретой точки изоляции жилы; θ_3 – то же на поверхности провода; $\theta_{\text{окр}}$ – то же окружающей среды.

Как известно, тепловое сопротивление проводников намного меньше теплового сопротивления изоляции. Поэтому тепловым сопротивлением R_1 будем пренебрегать, то есть считать его равным нулю. В этом случае будет выполняться равенство $\theta_1 = \theta_2$.

Теплоемкостью окружающей среды также можно пренебречь, поскольку удельная теплоемкость воздуха значительно ниже удельных теплоемкостей проводников и диэлектриков.

На рис. 3 приведена тепловая схема замещения изолированного одножильного провода после указанных выше упрощений.

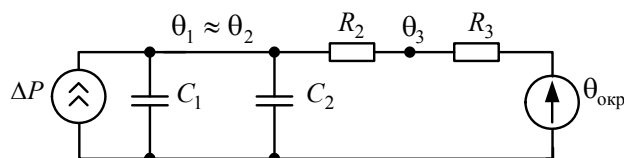


Рис. 3. Тепловая схема замещения изолированного одножильного провода
после упрощений

Fig. 3. Thermal replacement circuit of an insulated single-core
wire after the simplifications

Из схемы видно, что теплоемкости C_1 и C_2 образуют суммарную теплоемкость $C = C_1 + C_2$.

Рассмотрим расчетные формулы для параметров тепловой схемы замещения в соответствии с [1, 2].

Потери мощности в жиле будем определять по известной формуле, но с учетом зависимости сопротивления жилы от температуры

$$\Delta P = I^2 R_{\text{эл}} = I^2 r_{\text{км}} L (1 + k_{\theta} (\theta_2 - 25)), \quad (2)$$

где I – ток в жиле, А; $R_{\text{эл}}$ – электрическое сопротивление жилы, Ом; $r_{\text{км}}$ – удельное сопротивление жилы на 1 км при 25 °С, Ом/км; L – длина провода, км; k_{θ} – температурный коэффициент сопротивления, 1/°С; θ_1 – температура провода, °С.

Тепловое сопротивление изоляции рассчитывается следующим образом [6]:

$$R_2 = \frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi\gamma L}, \quad (3)$$

где d_1 – диаметр жилы, м; d_2 – то же изоляции жилы, м; γ – удельная теплопроводность материала изоляции, Вт/(°С·м); L – длина провода, м.

Тепловое сопротивление окружающей среды будем определять по известной формуле [6]

$$R_3 = \frac{1}{\alpha F} = \frac{1}{\alpha \pi d_2 L}, \quad (4)$$

где α – коэффициент теплоотдачи с поверхности провода, Вт/(°С·м²); F – площадь поверхности теплоотдачи, м².

Теплоемкость провода равна

$$C = C_1 + C_2 = c_1 G_1 + c_2 G_2 = c_1 \rho_1 \pi \frac{d_1^2}{4} L + c_2 \rho_2 \pi \frac{d_2^2}{4} L = \frac{\pi L}{4} (c_1 \rho_1 d_1^2 + c_2 \rho_2 d_2^2), \quad (5)$$

где c_1 – удельная теплоемкость материала жилы, Вт·с/(°С·кг); c_2 – то же изоляции жилы, Вт·с/(°С·кг); ρ_1 – плотность материала жилы, кг/м³; ρ_2 – то же изоляции жилы, кг/м³.

Далее рассмотрим расчет коэффициента теплоотдачи α в формуле (4). С определением этого параметра всегда имеются трудности, так как он зависит от множества факторов.

Известно, что коэффициент теплоотдачи содержит три слагаемые

$$\alpha = \alpha_{\text{изл}} + \alpha_{\text{кон.ест}} + \alpha_{\text{кон.вын}}, \quad (6)$$

где $\alpha_{\text{изл}}$ – коэффициент теплоотдачи излучением; $\alpha_{\text{кон.ест}}$ – то же при естественной конвекции; $\alpha_{\text{кон.вын}}$ – то же при вынужденной конвекции.

Коэффициент теплоотдачи излучением $\alpha_{\text{изл}}$ определяется по формуле [9]

$$\alpha_{\text{изл}} = \varepsilon_n \sigma \frac{(\theta_3 + 273)^4 - (\theta_{\text{окр}} + 273)^4}{\theta_3 - \theta_{\text{окр}}}, \quad (7)$$

где ε_n – коэффициент излучения (значение данного параметра зависит от материала поверхности, наличия оксидных пленок, загрязнения и т. д.); σ – постоянная Стефана – Больцмана для излучения абсолютно черного тела, равная $5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции $\alpha_{\text{кон.ест}}$ можно рассчитать следующим образом [10]:

$$\alpha_{\text{кон.ест}} = 0,0749 \sqrt{\frac{p_{\text{атм}}}{\theta_{\text{окр}} + 273}} \sqrt[4]{\frac{\theta_3 - \theta_{\text{окр}}}{d_2}}, \quad (8)$$

где $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, Па.

Коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции $\alpha_{\text{кон.вын}}$ определяется по выражению [10]

$$\alpha_{\text{кон.вын}} = 0,044 \frac{k_v (p_{\text{атм}} v)^{0,6}}{((\theta_{\text{окр}} + 273) d_2)^{0,4}}, \quad (9)$$

где k_v – коэффициент угла атаки ветра; v – скорость ветра, м/с.

При расчетах для наихудших условий нагрева проводов скорость ветра можно принять равной нулю. Тогда соответственно параметр $\alpha_{\text{кон.вын}}$ будет равен нулю.

Рассмотрим выражение для нестационарного теплового процесса провода на основе тепловой схемы замещения (рис. 3). Для этого запишем уравнение в операторной форме для температуры наиболее нагретой точки изоляции θ_2 , используя метод наложения. В результате получим

$$\theta_2(p) = \frac{R_2 + R_3}{1 + pC(R_2 + R_3)} \Delta P(p) + \frac{1}{1 + pC(R_2 + R_3)} \theta_{\text{окр}}(p), \quad (10)$$

где p – оператор преобразования Лапласа.

Если температуру окружающей среды считать постоянной ($\theta_{\text{окр}} = \text{const}$), то в соответствии с правилами операторного преобразования Лапласа выражение (10) примет вид

$$\theta_2(p) = \frac{R_2 + R_3}{1 + p \cdot C \cdot (R_2 + R_3)} \cdot \Delta P(p) + \theta_{\text{окр}}. \quad (11)$$

Для температуры поверхности провода θ_3 расчетное выражение получим аналогичным образом

$$\theta_3(p) = \frac{R_3}{1 + pC(R_2 + R_3)} \Delta P(p) + \theta_{\text{окр}}. \quad (12)$$

В случае неизолированного провода все расчеты аналогичны, только тепловое сопротивление изоляции R_2 необходимо принять равным нулю. При этом будет справедливо равенство $\theta_2 = \theta_3$. Это значит, что для такого провода потребуется рассчитывать только температуру его поверхности в соответствии с выражением (12).

Алгоритмы расчета температур одножильного провода для воздушной ЛЭП

Находя по правилам обратного преобразования Лапласа оригинал операторного изображения из формулы (11) и используя методику дискретизации во времени, предложенную в [3], получим алгоритм расчета температуры изоляции провода θ_2 :

$$\begin{cases} \tau_n = C(R_2 + R_3); \\ s = (R_2 + R_3) \Delta P; \\ v_i = s + (v_{i-1} - s) \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau_n}}; \\ \theta_{2,i} = v_i + \theta_{\text{окр}}, \end{cases} \quad (13)$$

где τ_n – тепловая постоянная времени провода; i – номер расчетного интервала; s – установившееся значение превышения расчетной температуры θ_2 над температурой окружающей среды; v_i – превышение расчетной температуры θ_2 над температурой окружающей среды; Δt – период дискретизации.

Аналогично на основе выражения (12) можно получить алгоритм для расчета температуры поверхности провода θ_3 .

Из формул (2) и (7)–(9) следует, что в расчетах должны присутствовать две нелинейности: зависимость электрического сопротивления жилы от температуры и зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры. Для учета этих нелинейностей расчет будем вести итерационным методом в такой последовательности:

- 1) расчет значения теплового сопротивления R_2 по формуле (3);
- 2) расчет значения теплоемкости по (5);
- 3) присвоение начальных условий в алгоритме (13): $v_0 = 0$ и $\theta_{2,0} = \theta_{\text{окр}}$;
- 4) присвоение $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{°C} \cdot \text{м}^2)$ (минимально возможное значение для проводов);
- 5) начало внешнего цикла по итерациям;
- 6) начало внутреннего цикла по i ;
- 7) расчет значения потерь мощности по формуле (2);
- 8) расчет значения теплового сопротивления R_3 по (4);

9) выполнение расчета по алгоритму (13);

10) расчет коэффициента теплоотдачи по формулам (7)–(9).

Исследования алгоритма показали, что для получения окончательного результата требуется только 3–4 итерации.

Моделирование тепловых процессов провода с несколькими жилами для воздушной ЛЭП

Как показано в [3], моделирование тепловых процессов в многожильных кабелях и проводах – достаточно трудоемкая задача и расчеты удобно сводить к эквивалентному одножильному проводу (или кабелю), если по жилам протекают приблизительно равные токи. Такой же подход предлагается и в [7, с. 355].

В случае равенства токов в жилах внутри провода устанавливаются равные температуры на соответствующих симметричных участках относительно осей симметрии. Это значит, что на таких участках отсутствует теплообмен (так как нет разности температур) и их условно можно вырезать из провода. Таким образом, каждая из жил имеет теплообмен с окружающей средой через некоторый угловой сектор β , показанный на рис. 4 для проводов с разным количеством жил. Угол β будем называть углом теплообмена.

На рис. 4 углы β формируются через касательные, проведенные от центра жилы к поверхности изоляции соседних жил. Из прямоугольного треугольника ABC (рис. 4а) следует, что угол $\alpha = 30^\circ$. Тогда $\beta = 360 - 2\alpha = 300^\circ$. Таким же путем можно получить значения для углов β других типов проводов: с тремя жилами $\beta = 270^\circ$ (рис. 4б), с четырьмя жилами $\beta = 210^\circ$ (рис. 4с).

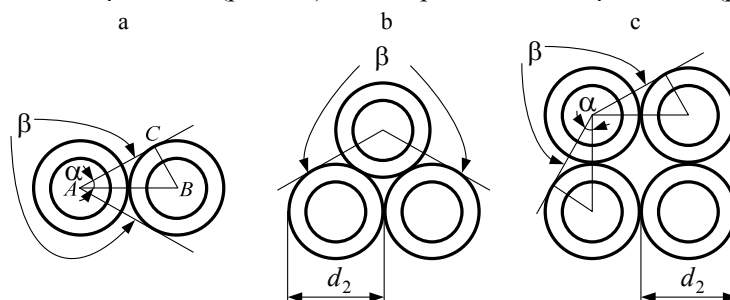


Рис. 4. Расположение возможных зон теплообмена жил проводов:

а – две жилы; б – три жилы; с – четыре жилы

Fig. 4. Location of possible heat exchange wire cores zones:

а – 2 cores; б – 3 cores; с – 4 cores

Реальные значения углов β могут отличаться от полученных теоретически, так как в проводах типа СИП (и подобных им) жилы соединены не плотно и скручены между собой. Более точные значения углов β ниже определены экспериментальным путем.

Рассмотрим влияние угла β на значения тепловых сопротивлений.

Из теории теплотехники известно, что тепловое сопротивление обратно пропорционально площади поверхности теплоотдачи, как в формуле (4). При этом для цилиндрического тела площадь его поверхности пропорцио-

нальна длине окружности по его сечению, которая, в свою очередь, пропорциональна некоторому параметру b , определяемому по формуле

$$b = \frac{\beta}{360}. \quad (14)$$

Из (4) следует, что тепловое сопротивление обратно пропорционально параметру b . Таким образом, при расчетах тепловых сопротивлений R_2 и R_3 для многожильных проводов в знаменатели формул (3) и (4) необходимо добавить параметр b :

$$R'_2 = \frac{R_2}{b}; \quad R'_3 = \frac{R_3}{b}. \quad (15)$$

Используя соотношения (15), расчеты температур для многожильного провода можно свести к расчетам для эквивалентного одножильного провода по изложенным выше алгоритмам.

Экспериментальные исследования тепловых процессов в проводах

Для проверки точности разработанной математической модели тепловых процессов на кафедре «Электроснабжение» ГГТУ имени П. О. Сухого была создана установка, позволяющая пропускать через испытуемые провода трехфазные или однофазные токи значением до нескольких сотен ампер. Установка состоит из понижающего трехфазного трансформатора, в окна магнитопровода которого пропущены провода, соединенные с испытуемым проводом таким образом, чтобы в каждой фазе образовывались короткозамкнутые витки. Регулируя напряжение со стороны первичной обмотки трансформатора, можно изменять значения токов в жилах провода.

В процессе исследований с помощью измерительных приборов и видеокамер, направленных на дисплеи этих приборов, в компьютер записывались следующие величины:

- падение напряжения на жиле провода;
- ток в жиле провода;
- температура на жиле провода;
- температура на поверхности провода;
- температура воздуха на расстоянии 20 см от провода.

Ток подавался на жилу скачкообразно и поддерживался приблизительно на одном и том же значении.

Экспериментальная температура изоляции Θ_2 определялась по формуле, которая следует из зависимости сопротивления жилы от температуры (2):

$$\Theta_2 = \frac{1}{k_\Theta} \left(\frac{\Delta U \cdot 1000}{I L r_{km}} - 1 \right) + 25, \quad (16)$$

где ΔU – падение напряжения на жиле провода.

На рис. 5 приведены временные диаграммы расчетной и измеренной температур изоляции для одной жилы провода СИП-4 сечением 16 мм² при токе 100 А и температуре воздуха 27,5 °С.

Из рис. 5 видно, что кривые достаточно близки друг к другу, как в нестационарном, так и в стационарном режимах. Это свидетельствует о хорошей точности математической модели.

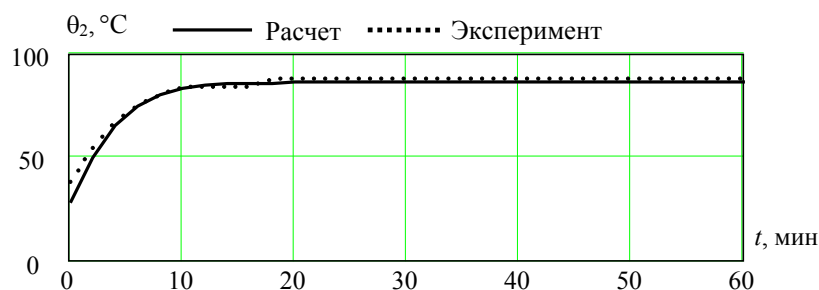


Рис. 5. Расчетная и экспериментальная диаграммы нестационарного теплового процесса для одной жилы провода СИП-4

Fig. 5. Calculation and experimental diagrams of the non-stationary thermal process for one core of the SIP-4 wire

Установившееся значение расчетной температуры составило 86,1 °С, а экспериментальной 88,1 °С, что для провода марки СИП близко к допустимому значению температуры 90 °С при длительно допустимом справочном значении тока 100 А.

Для определения экспериментальных значений угла теплообмена β (формула (14)) были использованы экспериментальные значения температур для провода СИП-4 сечением 16 мм² с различным количеством жил при токе в одной жиле 100 А. В результате получены значения, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Значения экспериментальных и расчетных параметров
Values of experimental and calculated parameters

Количество жил	Теоретический угол β	Экспериментальный угол β	Экспериментальный параметр b	Понижающий коэффициент k
Две	300°	260°	0,722	0,85
Три	270°	240°	0,667	0,82
Четыре	210°	230°	0,639	0,80

Из таблицы следует, что экспериментальные значения угла β существенно отличаются от теоретических, особенно для провода с двумя жилами. Это можно объяснить сложностью тепловых потоков в скрученных между собой жилах.

Экспериментальные исследования выполнены для проводов марки СИП-4 с одной, двумя, тремя и четырьмя жилами сечением 16, 25, 35 и 50 мм² при различных токах. Также был исследован провод марки А16. Во всех случаях использовались значения параметра b из табл. 1. В результате максимальная абсолютная погрешность расчетной температуры изоляции провода по отношению к измеренной составила 6 °С, а максимальное значение тепловой постоянной времени 13,3 мин.

В случае трехфазных ЛЭП в экспериментальных исследованиях предполагалась их симметричная нагрузка. В реальной ситуации в таких ЛЭП всегда наблюдается несимметрия. Однако симметричный режим приводит к тому, что центральная часть провода не участвует в теплообмене, и каждая из жил обменивается теплом с окружающей средой, как было показано выше, через угол теплообмена β . Следовательно, такой режим является наихудшим с точки зрения тепловых процессов, что согласуется с задачами проектирования систем электроснабжения.

Корректировка длительно допустимых токов проводов СИП-4

Для проводов СИП-4 в каталогах и справочной литературе длительно допустимые токи даются в зависимости от сечения жилы без учета количества жил. Однако экспериментальные исследования, выполненные авторами данной статьи, показали, что при наличии двух и более жил длительно допустимый ток приводит к превышению допустимой температуры, равной 90 °С. Это значит, что в зависимости от количества жил провода его длительно допустимый ток должен умножаться на понижающий коэффициент k . Рассмотрим расчет этого коэффициента.

Из тепловой схемы замещения (рис. 3) и соотношения (11) следует, что установившееся значение температуры изоляции θ_2 равно

$$\theta_2 = (R_2 + R_3) \Delta P + \theta_{\text{окр}}. \quad (17)$$

С учетом формул (2) и (15) выражение (17) перепишем в виде

$$\theta_2 = \frac{(R_2 + R_3)}{b} I^2 R_{\text{эл}} + \theta_{\text{окр}}. \quad (18)$$

Откуда получим уравнение для длительно допустимого тока

$$I = \sqrt{\frac{(\theta_2 - \theta_{\text{окр}}) b}{(R_2 + R_3) R_{\text{эл}}}}. \quad (19)$$

В существующих справочных данных для проводов СИП-4 считается, что $b = 1$, то есть не учитывается количество их жил. Из формулы (19) следует, что длительно допустимый ток пропорционален $\sqrt{b}$. Это значит, что понижающие коэффициенты k в зависимости от количества жил провода будут определяться по выражению

$$k = \sqrt{b}. \quad (20)$$

Экспериментальные значения этих коэффициентов, полученные по выражению (20), приведены в последнем столбце в табл. 1.

Например, для провода СИП-4 4×16 допустимый ток должен быть не 100 А, как дается в справочниках, а $100 \cdot \sqrt{0,639} = 100 \cdot 0,8 = 80$ А при температуре окружающей среды 25 °С.

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика расчета нестационарных тепловых процессов в проводах низковольтных воздушных ЛЭП.

2. Экспериментальные исследования для различных марок проводов при различных токах показали, что максимальная абсолютная погрешность расчетной температуры изоляции провода по отношению к измеренной температуре не превысила 6 °С.

3. Определены значения понижающих коэффициентов для длительно допустимых токов проводов СИП-4 в зависимости от количества их жил.

4. Предложенные в статье методики и алгоритмы расчета могут быть использованы для оценки пропускной способности низковольтных электрических сетей, а также на этапе проектирования систем электроснабжения [13, 14].

Исследования выполнены в рамках НИР «Разработка методики оценки пропускной способности электрических сетей 0,4 кВ в условиях роста электропотребления бытовых потребителей частного жилого фонда» в сотрудничестве с РУП «Гомельэнерго».

ЛИТЕРАТУРА

1. Thermal Analysis of Parallel Underground Energy Cables / J. Desmet, D. Putnam, G. Vanalme [et al] // 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2005). Turin, Italy, 2005. P. 1–4. <https://doi.org/10.1049/cp:20050921>.
2. Schmidt, H.-P. Efficient Simulation of Thermal and Electrical Behaviour of Industrial Cables / H.-P. Schmidt // Modelling and Simulation / Eds. G. Petrone, G. Cammarata. Intechopen, 2008. P. 523–532. <https://doi.org/10.5772/5967>.
3. Зализный, Д. И. Математическая модель тепловых процессов одножильного силового кабеля / Д. И. Зализный, С. Н. Прохоренко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2012. № 5. С. 25–34.
4. Зализный, Д. И. Методика численного расчета нестационарных тепловых процессов в изоляции силового кабеля / Д. И. Зализный, М. Н. Новиков, Н. М. Ходанович, А. Ю. Шутов // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2010. № 4. С. 86–96.
5. Зализный, Д. И. Адаптивная математическая модель тепловых процессов трехжильного силового кабеля / Д. И. Зализный, О. Г. Широков // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2014. № 2. С. 51–63.
6. Ларина, Э. Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии: учеб. для вузов / Э.Т. Ларина. М.: Энергоатомиздат, 1996. 464 с.
7. Дмитриев, М. В. Кабельные линии высокого напряжения / М. В. Дмитриев. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. 688 с.
8. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Ч. 2-1: Тепловое сопротивление. Расчет теплового сопротивления: ГОСТ Р МЭК 60287-2-1–2009. Введ. 26.07.2009. М.: Стандартинформ, 2009. 32 с.
9. Основы кабельной техники / В. М. Леонов, И. Б. Пешков, И. Б. Рязанов, С. Д. Холодный. М.: Изд. центр «Академия», 2006. 432 с.
10. Математическая модель расчета потерь мощности в изолированных проводах с учетом температуры / С. С. Гиршин, А. А. Бубенчиков, Е. В. Петрова, В. Н. Горюнов // Омский научный вестник. 2009. № 3(83). С. 176–179.
11. A thermal Model for Calculating Axial Temperature Distribution of Overhead Conductor under Laboratory Conditions / X. Zhang, Z. Ying, Y. Chen, X. Chen // Electric Power Systems Research. 2019. Vol. 166. P. 223–231. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.10.008>.
12. Riba, J.-R. Analyzing the Role of Emissivity in Stranded Conductors for Overhead Power Lines / J.-R. Riba, L. Yuming, M.-E. Manuel // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2024. Vol. 159. P. 110027. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.110027>.

13. 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>.
14. Данилов, М. И. Оперативная идентификация сопротивлений проводов распределительных сетей 380 В автоматизированными системами учета / М. И. Данилов, И. Г. Романенко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 2. С. 124–140. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-124-140>.

Поступила 24.12.2024 Подписана в печать 26.02.2025 Опубликовано онлайн 31.07.2025

REFERENCES

1. Desmet J., Putman D., Vanalme G., Belmans R., Vandommelent D. (2005) Thermal Analysis of Parallel Underground Energy Cables. *CIREN 2005 – 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, Turin, Italy, 2005, 1–4. <https://doi.org/10.1049/cp: 200 50921>.
2. Schmidt H.-P. (2008). Efficient Simulation of Thermal and Electrical Behaviour of Industrial Cables. Petrone G., Cammarata G. (eds.). *Modelling and simulation*. Intechopen, 523–532. <https://doi.org/10.5772/5967>.
3. Zalizny D. I., Prohorenko S. N. (2012) Mathematical Model for Thermal Processes of Single-Core Power Cable. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 25–34 (in Russian).
4. Zalizny D. I., Novikov M. N., Khodanovich N. M., Shutov A. Yu. (2010) Method of Numerical Calculation of Non-Stationary Thermal Processes in the Insulation of a Power Cable. *Vestnik Gomel'skogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta imeni P. O. Sukhogo*, (4), 86–96 (in Russian).
5. Zalizny D. I., Shirokov O. G. (2014) Adaptive Mathematical Model of Thermal Processes of a Three-Core Power Cable. *Vestnik Gomel'skogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta imeni P. O. Sukhogo*, (2), 51–63 (in Russian).
6. Larina E. T. (1996) *Power Cables and High-Voltage Cable Lines*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 464 (in Russian).
7. Dmitriev M. V. (2021) *High Voltage Cable Lines*. St. Petersburg, Polytech Press. 688 (in Russian).
8. GOST R IEC 60287-2-1:1994. *Electric Cables – Calculation of the Current Rating – Part 2-1: Thermal Resistance – Calculation of Thermal Resistance (IDT)*. Moscow, Standartinform, 2009. 32 (in Russian).
9. Leonov V. M., Peshkov I. B., Ryazanov I. B., Kholodny S. D. (2006) *Fundamentals of Cable Technology*. Moscow, Publishing Center “Academy”. 432 (in Russian).
10. Girshin S. S., Bybenchikov A. A., Gorynov V. N., Levchenko A. A., Petrova E. V. (2009) A Mathematical Model for Power Losses in Insulated Wires Taking Temperature into Account. *Omsk Scientific Bulletin*, (3), 176–179 (in Russian).
11. Zhang X., Ying Z., Chen Y., Chen X. (2019) A Thermal Model for Calculating Axial Temperature Distribution of Overhead Conductor under Laboratory Conditions. *Electric Power Systems Research*, 166, 223–231. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.10.008>.
12. Riba J.-R., Yuming L., Manuel M.-E. (2024) Analyzing the Role of Emissivity in Stranded Conductors for Overhead Power Lines. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 159, 110027. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.110027>.
13. Fursanov M. I., Zolotoy A. A., Makarevich V. V. (2018) Calculation of Technological Consumption (Loss) of Electricity in Modern 0.38–10 kV Electrical Distribution Networks. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (5) 408–422. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-408-422> (in Russian).
14. Danilov M. I., Romanenko I. G. (2023) Operational Identification of Resistances of Wires of 380 V Distribution Networks by Automated Accounting Systems. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (2), 124–140. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-124-140> (in Russian).

Received: 24 December 2024

Accepted: 26 February 2025

Published online: 31 July 2025

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-324-342>

УДК 621.3

Система автоматизированной обработки результатов тепловизионной диагностики электрооборудования

А. Д. Косенко¹⁾, В. А. Величко¹⁾, А. А. Косенко¹⁾

¹⁾Оренбургский государственный университет (Оренбург, Российская Федерация)

Реферат. Развитие электроэнергетики сопровождается улучшением средств диагностики состояния оборудования в энергетических системах. Часть оборудования электрических сетей значительно изношена и требует повышенного внимания для определения остаточного ресурса. Синтез интеллектуальных технологий и общепринятых методов диагностики является следующей ступенью на пути к будущему электроэнергетики. Цель работы – разработка принципов функционирования системы автоматизированной обработки результатов тепловизионной диагностики электрооборудования. В работе исследуются критерии оценки дефектов электрооборудования на основе температуры нагрева. Алгоритм для автоматизации обработки результатов тепловизионной диагностики электрооборудования разрабатывается на базе искусственных нейронных сетей. Программная реализация детектирования элементов электроустановок на инфракрасных снимках выполняется с использованием архитектуры YOLOv5. Тестирование и оценка обученной нейронной сети производятся с использованием данных тепловизионной диагностики работающего электрооборудования. Обученная в рамках исследования модель нейронной сети по результатам детектирования термограмм из тестовой выборки демонстрирует уверенное обнаружение деталей электроустановок. По результатам анализа нормативной документации был формализован подход к определению степени развития дефектов. Помимо использования термограмм сетевого оборудования фиксируются также токовая нагрузка и температура окружающего воздуха для выбора подходящей формулы пересчета превышения температуры или избыточной температуры узла электроустановки или контактного соединения. Разработанный алгоритм по автоматизации обработки результатов тепловизионной диагностики электроустановок на базе нейросети YOLOv5 отражает основные процессы, необходимые для функционирования системы. Сформирован и размечен пользовательский набор данных, включающий термограммы реально существующих электроустановок, на основании которого была обучена модель нейросети. Использование тестовой выборки позволило рассчитать значения метрик для оценки качества обучения модели YOLOv5. Разработанная система апробирована на термограммах электрооборудования. Ее использование позволяет в автоматизированном режиме выявить не только развившиеся дефекты, но и начальную стадию возникновения неисправностей.

Ключевые слова: тепловизионная диагностика электрооборудования, термограмма электроустановки, инфракрасный контроль, инфракрасная диагностика, превышение температуры, избыточная температура, контактное соединение, детектирование объектов, сверточные нейронные сети, нейросеть YOLO

Для цитирования: Косенко, А. Д. Система автоматизированной обработки результатов тепловизионной диагностики электрооборудования / А. Д. Косенко, В. А. Величко, А. А. Косенко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 4. С. 324–342. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-324-342>

Адрес для переписки

Косенко Анастасия Дмитриевна
Оренбургский государственный университет
просп. Победы, 13,
460018, г. Оренбург, Российская Федерация
Тел.: +7 353 237-28-91
fiara@inbox.ru

Address for correspondence

Kosenko Anastasia D.
Orenburg State University
13, Pobedy Ave.,
460018, Orenburg, Russian Federation
Tel.: +7 353 237-28-91
fiara@inbox.ru

The System for Automated Processing of the Results of Thermal Imaging Diagnostics of Electrical Equipment

A. D. Kosenko¹⁾, V. A. Velichko¹⁾, A. A. Kosenko¹⁾

¹⁾Orenburg State University (Orenburg, Russian Federation)

Abstract. The development of the electric power industry is accompanied by the improvement of diagnostic tools for the state of equipment in energy systems. Some of the electrical network equipment is significantly worn out and requires increased attention in order to determine the residual resource. The synthesis of intelligent technologies and generally accepted diagnostic methods is the next step towards the future of the electric power industry. The aim of the project is to develop the principles for the functioning of an automated processing system for results of thermal imaging diagnostics of electrical equipment. The paper examines the criteria for evaluating defects in electrical equipment based on the heating temperature. An algorithm for automating the processing of the results of thermal imaging diagnostics of electrical equipment is also being developed on the basis of artificial neural networks. The software implementation of the detection of electrical installation elements in infrared images is performed using the YOLOv5 architecture. Testing and evaluation of the trained neural network are performed using thermal imaging diagnostics data of working electrical equipment. The neural network model trained as part of the study demonstrates confident detection of electrical installation parts based on the results of detecting thermograms from a test sample. Based on the results of the analysis of regulatory documentation, an approach to determining the degree of defect development has been clearly laid out. In addition to using thermal images of electrical grid equipment, the current load and ambient temperature are also recorded to select a suitable formula for calculating temperature excess or excessive temperature of an electrical installation unit or contact connection. The developed algorithm for automating the processing of the results of thermal imaging diagnostics of electrical installations based on the YOLOv5 neural network reflects the main processes necessary for the functioning of the system. A custom dataset was generated and marked up, including thermograms of real-life electrical installations, on the basis of which a neural network model was trained. Using a test sample, we were able to calculate the values of metrics to evaluate the quality of YOLOv5 model learning. The developed system has been tested on thermograms of electrical equipment. Its use makes it possible to identify not only the developed defects, but also the initial stage of the occurrence of defects in an automated mode.

Keywords: thermal imaging diagnostics of electrical equipment, thermal image of an electrical installation, infrared monitoring, infrared diagnostics, temperature excess, excessive temperature, contact connections, object detection, convolutional neural networks, YOLO neural networks

For citation: Kosenko A. D., Velichko V. A., Kosenko A. A. (2025) The System for Automated Processing of the Results of Thermal Imaging Diagnostics of Electrical Equipment. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (4), 324–342. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-324-342> (in Russian)

Введение

Интеллектуальные технологии и средства мониторинга и диагностики состояния оборудования в энергетических системах – одна из составляющих ряда приоритетных мер, способствующих развитию электроэнергетики в соответствии с Энергетической стратегией Российской Федерации на период до 2035 г. [1].

Одним из путей реализации вышеуказанных мероприятий является разработка автоматизированных программных комплексов, способных свести

к минимуму влияние «человеческого фактора» на результаты диагностики электроустановок и сделать обработку данных более оперативной.

Проблема износа силовых электроустановок энергетической системы проявляется все чаще с увеличением срока их эксплуатации. В результате ограниченного финансирования работ по реконструкции существенная доля оборудования электрических сетей на сегодняшний день выработала свой срок службы и находится на пределе возможностей. Так, например, по данным компании «Таврида Электрик», «средний возраст оборудования подстанций 35 кВ составляет 35 лет, а возраст около 20 % оборудования приближается к отметке 45–50 лет» [2].

Электроустановки высокого напряжения на протяжении всего срока службы подвержены влиянию различных факторов: сильных электромагнитных полей, механических воздействий, неблагоприятных погодных условий. Для снижения рисков повреждения электрооборудования в процессе эксплуатации регулярно производится его диагностика. Цель технической диагностики заключается в оценке состояния технической системы в условиях ограниченной информации и, как следствие, повышении надежности остаточного ресурса оборудования [3, 4].

По признаку воздействия различают методы разрушающего и неразрушающего контроля. По результатам анализа научно-технической литературы в области диагностики высоковольтного оборудования установлено, что наиболее часто используется группа методов неразрушающего контроля [3, 5–7]. Теме диагностики изоляции силовых трансформаторов, кабелей и других конструкций методом частичных разрядов посвящены работы [8–10]. В [11] изложена методика вибрационного обследования силовых трансформаторов. Хроматографический анализ масла в качестве одного из методов мониторинга состояния силовых трансформаторов приводят в [12]. Применение инфракрасной (ИК) термографической диагностики в целях выявления неисправностей электротехнических устройств упоминается в работах [13–15]. Практическая значимость каждого из вышеперечисленных методов контроля подтверждается наличием нормативной документации [16, 17].

В настоящее время периодическая инфракрасная диагностика оборудования энергосистемы позволяет оперативно обнаруживать дефекты. В процессе термографирования специалисты создают значительное количество инфракрасных изображений, каждое из которых можно рассматривать как массив данных. Для определения температуры объекта на термограмме необходимо учитывать различные внешние факторы и пользоваться формулами пересчета [16]. Автоматизация процесса обработки термограмм применительно к инфракрасному контролю электроустановок способна увеличить производительность труда специалистов по тепловизионной диагностике, тем самым реализовав одно из приоритетных мероприятий энергетической стратегии. В связи с этим целью работы является разработка принципов функционирования системы автоматизированной обработки результатов тепловизионной диагностики электрооборудования.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

- выбрать критерии оценки дефектов электрооборудования на основе температуры нагрева;
- разработать алгоритм для автоматизации обработки результатов тепловизионной диагностики электрооборудования на базе искусственных нейронных сетей;
- программно реализовать детектирование элементов электроустановок на инфракрасных снимках;
- провести тестирование и оценку обученной нейронной сети с использованием данных тепловизионной диагностики работающего электрооборудования.

Рассмотрим решение каждой из перечисленных выше задач.

Объекты и методика исследования

Зачастую на объектах электроэнергетики для получения ИК-изображений применяются переносные тепловизоры. Специалисты по тепловизионной диагностике производят съемку, по результатам которой создается массив термограмм, подлежащих обработке в специализированных программных комплексах с учетом требований нормативной документации [16, 17].

При обнаружении дефекта на тепловизионном снимке специалисту требуется его классифицировать. Эта задача решается путем сравнения температуры оборудования или токоведущей части с наибольшим допустимым значением температуры нагрева или ее превышения [16]. На следующем шаге по таблицам браковочных нормативов, исходя из рассчитанных значений превышения температуры или избыточной температуры, производится классификация дефекта. Как правило, электроустановки находятся не под номинальной нагрузкой, поэтому необходимо пользоваться формулами пересчета температуры [17]. Из приведенной методики видно, что при обработке большого количества изображений вручную могут потребоваться значительные затраты времени. Перспективным представляется использование автоматизированной системы для повышения скорости обработки ИК-изображений и снижения количества случайных вычислительных ошибок и человеческого фактора.

Автоматизированные системы в отличие от автоматических предполагают участие человека в производственном процессе [18]. Предлагаемая система будет способна взять на себя часть функций по обработке изображений, что в перспективе упростит труд специалистов при диагностике электроустановок.

Для формирования математической модели системы критериев определения дефектов был рассмотрен ряд нормативных документов в сфере ИК-диагностики электроустановок [15, 19]. При работе электроустановок с токами, отличными от номинальных, необходимо пользоваться формулами пересчета температуры в зависимости от нагрузки. В качестве примера рассмотрим формулы определения превышения температуры и избыточной температуры. Полученные значения сравниваются с браковочными нормативами при ИК-диагностике оборудования электрических сетей [16].

Превышение температуры – разность между измеренной температурой нагрева и значением температуры окружающего воздуха [16]. Критерий применяется при токе $(0,6-1,0)I_{\text{ном}}$

$$\frac{\Delta T_{\text{ном}}}{\Delta T_{\text{раб}}} = \left[\frac{I_{\text{ном}}}{I_{\text{раб}}} \right]^2, \quad (1)$$

где $\Delta T_{\text{ном}}$ – нормированное значение превышения температуры при номинальной нагрузке $I_{\text{ном}}$ (сравнивается с допустимой величиной по справочной таблице); $\Delta T_{\text{раб}}$ – значение превышения температуры при измерении при токе $I_{\text{раб}}$.

Нормированное значение превышения температуры 10–20 °С является начальной стадией развития дефекта для контактного соединения, 20–40 °С – развившимся дефектом, а более 40 °С – аварийным.

Избыточная температура – превышение измеренной температуры контролируемого узла одной фазы над температурой аналогичных узлов других фаз (с наименьшей температурой нагрева) или заведомо исправного узла [16]. Критерий применяется при токе $(0,3-0,6)I_{\text{ном}}$

$$\frac{\Delta T_{0,5}}{\Delta T_{\text{раб}}} = \left[\frac{0,5I_{\text{ном}}}{I_{\text{раб}}} \right]^2, \quad (2)$$

где $\Delta T_{0,5}$ – избыточная температура при токе нагрузки $0,5I_{\text{ном}}$; $\Delta T_{\text{раб}}$ – то же при токе нагрузки, отличном от $0,5I_{\text{ном}}$.

Если при токе нагрузки $0,5I_{\text{ном}}$ значения избыточной температуры контактного соединения составляют 5–10 °С, то это указывает на неисправность, которую следует держать под контролем; при 10–30 °С требуется усиленный контроль и при ≥ 30 °С аварийный дефект требует немедленного устранения.

При обработке ИК-изображения оператор сталкивается с необходимостью определения типа элемента электроустановки на изображении. Например, если производится обработка термограммы силового трансформатора, то вполне вероятно, что на снимке содержатся фрагменты изоляторов, радиаторов, контактных соединений. Как правило, для человека не составляет труда распознать, какой тип элемента электроустановки находится перед ним. Если на изображении находится множество фрагментов разных типов, для каждого из которых требуется определить значение температуры, подлежащей дальнейшему пересчету и сравнениям с нормативами, то задача усложняется, а также повышается риск возникновения ошибок.

В работе предложено использовать при обработке результатов ИК-диагностики сверточные нейронные сети (СНС) для обнаружения на инфракрасных изображениях элементов электроустановок [21–26]. В рамках исследования разработан алгоритм, позволяющий автоматизировать процесс обработки термограмм электрооборудования на основе детектирования объектов с помощью СНС (рис. 1). Алгоритм представлен в формате UML-диаграммы активностей. Применение нейросети обосновывается приоритетом внедрения интеллектуальных технологий в энергетике [1].

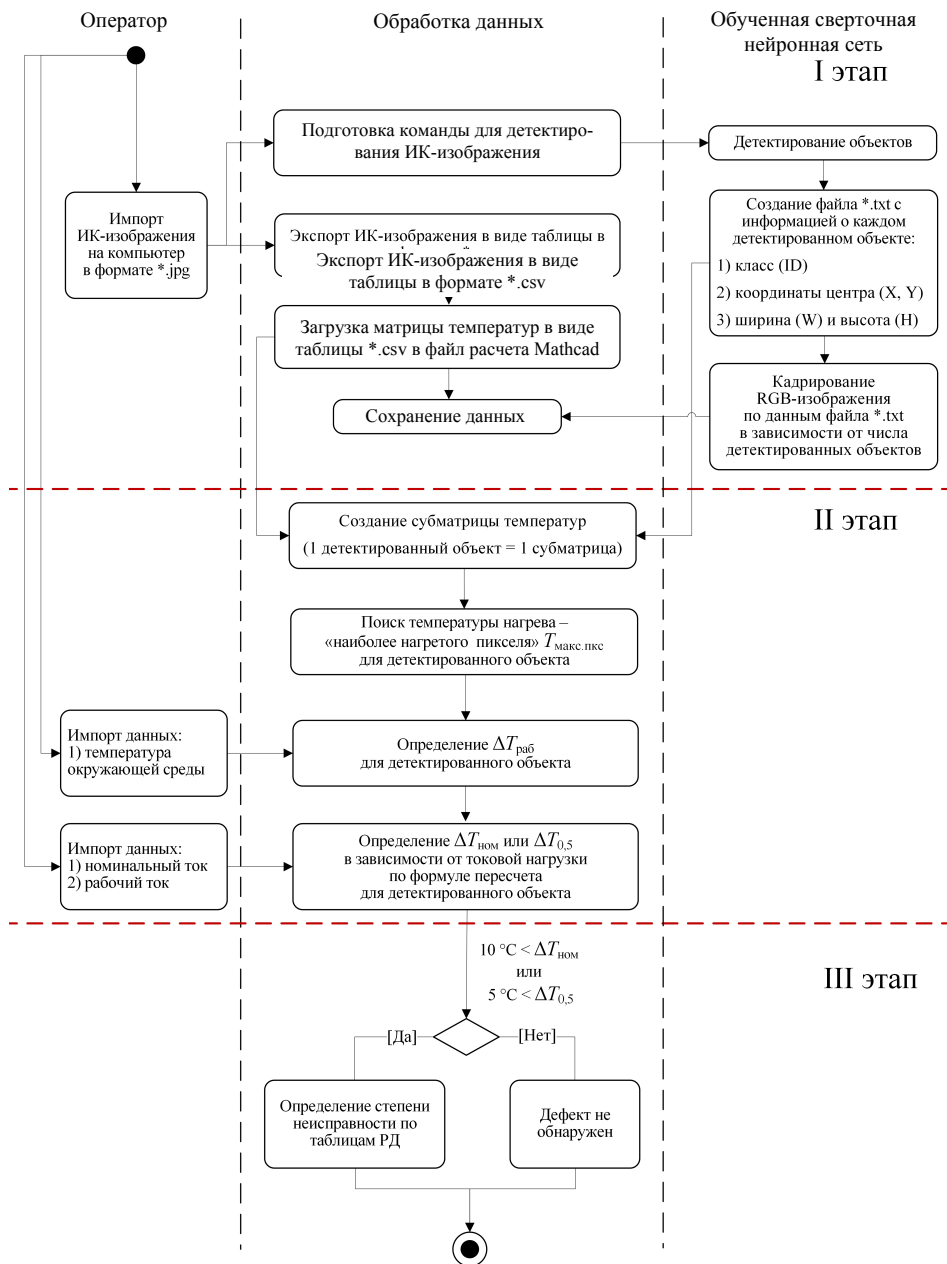


Рис. 1. Алгоритм для автоматизированной обработки термограмм электрооборудования: на первом этапе с использованием сверточных нейронных сетей детектируются объекты на ИК-изображении, создаются файлы *.txt и *.csv; на втором этапе создается субматрица температур, определяется температура $T_{\max.\text{пкс}}$, вычисляются $\Delta T_{\text{ном}}$ или $\Delta T_{0,5}$ в зависимости от токовой нагрузки; на третьем этапе производится выбор и проверка условия, делается вывод о наличии и степени неисправности

Fig. 1. Automation algorithm for processing thermograms of electrical equipment: at the first stage, objects are detected in the IR-image using convolutional neural networks, *.txt and *.csv files are created; at the second stage, a temperature submatrix is created, the temperature $T_{\max.\text{pxl}}$ is determined, ΔT_{rated} or $\Delta T_{0,5}$ is calculated depending on the current load; at the third stage, the condition is selected and checked, a conclusion is made about the presence and grade of the defect

На первом этапе оператор загружает на компьютер ИК-изображения в формате *.jpg. Работа алгоритма рассматривается на примере одной термограммы. Из исходного файла *.jpg экспортируется матрица температур, представляющая собой таблицу в формате *.csv. В предварительно созданный файл Mathcad, внутри которого производятся основные расчеты, записывается матрица температуры из таблицы *.csv. Параллельно с этим оператором подготавливается команда для детектирования ИК-изображения. Обученная модель СНС YOLOv5 детектирует объекты на изображениях и формирует файл *.txt. В этом текстовом файле содержится информация в виде строк чисел – каждая строка соответствует одному детектированному объекту. Работа алгоритма рассматривается на примере одного детектированного объекта. Одна строка файла *.txt содержит информацию о классе (ID), координатах центра (X, Y), ширине (W) и высоте (H) детектированного объекта. Параметры ID, X, Y, W, H записываются в файл расчета Mathcad в виде различных переменных. По параметрам из файла *.txt исходное изображение *.jpg кадрируется на несколько фрагментов, каждый из которых содержит только один детектированный объект. Полученные фрагменты сохраняются на диске, но непосредственно в расчетах не участвуют – применяются для оценки результатов детектирования.

На втором этапе производится создание субматрицы температур по данным таблицы *.csv и текстового файла *.txt. Субматрица представляет собой фрагмент исходной матрицы температур *.csv и соответствует местоположению детектированного объекта на изображении *.jpg. Создание субматриц производится в файле расчета Mathcad по формуле «один к одному» – одному детектированному объекту соответствует одна субматрица температур. Далее внутри полученной субматрицы производится поиск максимального числового значения $T_{\text{макс.пкс}}$ – температуры «наиболее нагретого пикселя». Параметр $T_{\text{макс.пкс}}$ назван температурой «наиболее нагретого пикселя» условно – подразумевается связь между наибольшим числовым значением из субматрицы температур ИК-изображения и цветом пикселя RGB-интерпретации этого ИК-изображения.

Параллельно с этим в файл расчета Mathcad заносятся данные о температуре окружающей среды, о рабочем и номинальном токах.

В процессе определения превышения температуры $\Delta T_{\text{раб}}$ при токе $I_{\text{раб}}$ используется $T_{\text{макс.пкс}}$ и температура окружающей среды.

Затем с использованием значений рабочего $I_{\text{раб}}$ и номинального $I_{\text{ном}}$ токов осуществляется определение значения превышения температуры при номинальной нагрузке $\Delta T_{\text{ном}}$ по формуле (1). При детектировании нескольких объектов одного класса для каждого из них в субматрице температур определяется $T_{\text{макс.пкс}}$, а затем имеется возможность определения избыточной температуры $\Delta T_{0,5}$ по формуле (2).

На третьем этапе производится проверка условия. В зависимости от того, под какой нагрузкой работает электрооборудование или токоведущая часть, выбирается превышение температуры $\Delta T_{\text{ном}}$ или избыточная $\Delta T_{0,5}$. Далее выбранное значение сравнивается с пороговым, например для $\Delta T_{\text{ном}} - 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для $\Delta T_{0,5} - 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Если величина превышения температуры или избыточной температуры превышает пороговое значение,

то производится определение степени неисправности по табл. 4-2 или 4-3 РД 153-34.0-20.363–99. В противном случае – дефект не обнаружен. Алгоритм завершается выводом информации о наличии или отсутствии дефекта, а также о его степени (при наличии).

Для решения задачи обнаружения частей электроустановок выбрана архитектура сверточной нейронной сети YOLOv5 (от англ. You Only Look Once) [27]. Указанное семейство моделей компьютерного зрения позволяет решать задачу детектирования объектов на изображениях или в видеопотоке. В частности, модель YOLOv5 заключает обнаруженные образы в ограничивающие рамки и записывает их координаты в текстовые файлы [28]. Такая технология позволяет не просто визуализировать обнаруженные элементы электроустановок для оператора, но и использовать отдельные регионы термограммы для определения температуры узлов электрооборудования.

Прежде чем использовать модель нейросети YOLOv5 для детектирования элементов электроустановок, необходимо произвести ее обучение на собственном наборе данных. На начальном этапе устанавливается необходимое программное обеспечение и загружаются предобученные веса YOLO. Вместе с этим подготавливается набор изображений для обучения нейросети YOLO с соблюдением соответствующей иерархической структуры [29]. Изображения из обучающего набора подлежат разметке. Для этого используется специализированное программное обеспечение, например OpenLabeling (рис. 2).

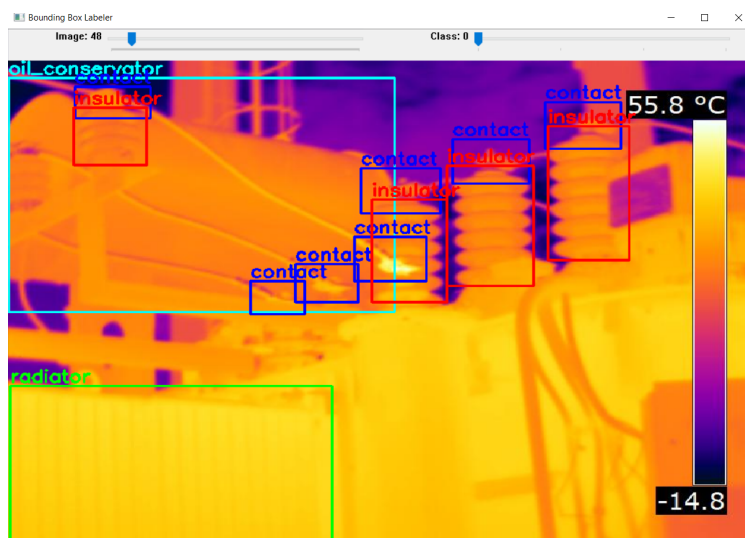


Рис. 2. ИК-изображение силового трансформатора с нанесенными вручную граничными рамками в программе OpenLabeling; различный цвет рамок обозначает принадлежность к соответствующим классам: «красный» – «изолятор», «синий» – «контактное соединение», «зеленый» – «радиатор», «бирюзовый» – «расширительный бак»

Fig. 2. IR-image of a power transformer with manually applied bounding boxes in the OpenLabeling tool; different colors of the boxes indicate belonging to the corresponding classes: “red” – “insulator”, “blue” – “contact”, “green” – “radiator”, “turquoise” – “oil conservator”

В результате работы с программой по разметке изображений создается текстовый файл, содержащий информацию о расположении и размерах граничных рамок, а также принадлежности образов внутри этих рамок к определенному классу. Каждый сгенерированный текстовый файл имеет название, позволяющее однозначно сопоставить его с изображением из доступной для разметки выборки. Полученный по такому принципу набор данных может быть использован для обучения нейросети YOLOv5.

По завершении процесса обучения генерируется файл с весами обученной СНС, который используется в дальнейшем для детектирования объектов на изображениях. В рамках данной работы файл весов используется для детектирования узлов электроустановок на ИК-снимках.

Среди параметров, которые определяют качество обучения, обычно преобладают вероятностные параметры. Традиционная матрица ошибок может быть представлена как совокупность четырех событий [30]: правильное обнаружение / True Positive (TP); правильное необнаружение / True Negative (TN); ложная тревога / False Positive (FP), ошибка I рода; пропуск события / False Negative (FN), ошибка II рода. Обычно выделяют три основные метрики для оценки качества обучения:

accuracy – доля правильных результатов работы алгоритма распознавания

$$accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}; \quad (3)$$

precision – доля объектов, которые названы алгоритмом распознавания положительными и при этом являющиеся таковыми (правильное распознавание)

$$precision = \frac{TP}{TP + FP}; \quad (4)$$

recall – доля объектов, которые названы алгоритмом положительными из всех объектов положительного класса, которые этот алгоритм нашел:

$$recall = \frac{TP}{TP + FN}. \quad (5)$$

Метрику *accuracy* (3) можно использовать в задачах обнаружения объектов одного класса, однако ее редко используют в задачах распознавания объектов разных классов, особенно в тех случаях, когда количество одних объектов существенно больше, чем других (несбалансированная выборка). В этом случае используются метрики *precision* (4) и *recall* (5), которые не зависят от соотношения классов. При этом требуется найти оптимальный баланс между этими двумя метриками. Кроме того, на практике удобнее пользоваться одной метрикой, которая включает в себя две предыдущие [30].

Существует несколько способов объединения метрик *precision* (4) и *recall* (5) в единый критерий качества, например в виде критерия, названно-

го F -мера, который представляет собой среднее гармоническое от значений двух критериев [30]:

$$F_{\beta} = (1 + \beta^2) \cdot \frac{\text{precision} \cdot \text{recall}}{(\beta^2 \cdot \text{precision}) + \text{recall}}, \quad (6)$$

где β – коэффициент, определяющий вес параметра *precision* в метрике (при равных значениях веса $\beta = 1$). Чем ближе значение F -меры к 1, тем успешнее работа сети по детектированию объектов.

Результаты исследования и их обсуждение

В работе для использования модели СНС при распознавании частей электроустановок проводилось ее предварительное обучение. Так как задача распознавания частей электроустановок с помощью СНС является узкоспециализированной, для ее решения использовался пользовательский набор данных (custom dataset [31]), включающий в себя ИК-снимки оборудования электрических сетей.

При обучении использовалась методология train-validation-test split, которая предполагает разделение исходного набора данных на три подмножества: the training set – обучающий набор (далее – train), the validation set – проверочный набор (далее – val), the test set – тестовый набор (далее – test) [32].

Для анализа результатов обучения модели нейросети YOLOv5 на пользовательском наборе данных было принято решение сформировать тестовый набор данных (test) из изображений, не входящих в обучающий (train) и проверочный набор (val) на этапе обучения модели. Иными словами, были подобраны изображения, не входящие в выборку, использовавшуюся при обучении модели.

Поскольку в работе рассматривается способ обнаружения на ИК-изображениях электроустановок дефектов отдельных узлов, предпочтительнее проводить оценку модели нейросети именно на тех изображениях, которые содержат дефекты. В тестовую выборку были включены также изображения без объектов для обнаружения, а также изображения, не содержащие дефектов узлов.

В качестве устройства для распознавания объектов авторами выбран персональный компьютер, на котором была произведена установка репозитория YOLOv5 и остальной необходимой инфраструктуры. В каталоге нейросети YOLO создана папка с названием testing_place, в которую затем был загружен отобранный для тестирования набор ИК-изображений.

Необходимо отметить, что для создания набора данных были выбраны ИК-изображения размером 800×600 пикселей. При подаче на вход нейросети YOLO происходит их масштабирование до 896×896 пикселей [28]. Для обучения модели YOLOv5 подготовлены 468 изображений (samples) в качестве тренировочной выборки. Также выбран размер пакета (batch), равный 8, а количество эпох обучения (epochs) было принято равным 16 [28].

Обучение нейросети YOLO производится по команде, включающей в себя указанные выше параметры (рис. 3).

```
!python train.py --img 896 --batch 8
--epochs 16 --data
'/content/drive/MyDrive/yolov5_exper
imental/custom_dataset/dataset.yaml'
--weights
'/content/drive/MyDrive/yolov5_exper
imental/custom_dataset/yolov5x.pt' -
--nosave --cache
```

Рис. 3. Команда на обучение модели нейросети YOLOv5: “--img” – размер изображения, подаваемого на вход YOLO, каждое изображение в формате 896×896 пикселей, параметр должен быть кратен числу 32; параметр “--batch” определяет число картинок, которые обработает нейросеть до обновления модели; “--epochs” – количество эпох, то есть полных проходов алгоритма через тренировочный набор данных; “--data” указывает путь к файлу конфигурации набора данных в формате “*.yaml”; “--weights” указывает путь к файлу предобученной модели нейросети в формате “*.pt”

Fig. 3. Training command for YOLOv5 neural network model: “--img” is the size of the image to the YOLO input: each image is in the format 896×896 pixels, the parameter must be a multiple of 32; the “--batch” parameter determines the number of pictures that the neural network will process before updating the model; “--epochs” – the number of epochs or complete runs of the algorithm through the training data set; “--data” – specifies the path to the data set configuration file in the “*.yaml” format; “--weights” – specifies the path to the file of the pre-trained neural network model in the “*.pt” format

Следующий шаг – вызов командной строки в каталоге yolov5-master и ввод команды на распознавание группы изображений (рис. 4).

```
C:\Experimental\yolov5-master>python detect.py --weights runs\train\last\last.pt --save-txt --save-crop --img 416
--conf 0.1 --source c:\Experimental\yolov5-master\testing_place\
detect: weights=[runs\train\last\last.pt], source=c:\Experimental\yolov5-master\testing_place\, data=data\coc
o128.yaml, imgsz=[416, 416], conf thres=0.1, iou thres=0.45, max_det=1000, device=, view_img=False, save_txt=True,
save_conf=False, save_crop=True, nosave=False, classes=None, agnostic_nms=False, augment=False, visualize=False,
update=False, project=runs\detect, name=exp, exist_ok=False, line_thickness=3, hide_labels=False, hide_conf=False,
half=False, dnn=False, vid_stride=1
YOLOv5 2023-2-4 Python-3.9.0 torch-1.13.1+cu117 CUDA:0 (NVIDIA GeForce GTX 1050 Ti, 4096MiB)

Fusing layers...
Model summary: 322 layers, 86193601 parameters, 0 gradients, 203.8 GFLOPs
image 1/15 C:\Experimental\yolov5-master\testing_place\IR_0724.jpg: 320x416 3 contacts, 89.7ms
image 2/15 C:\Experimental\yolov5-master\testing_place\IR_1450.jpg: 320x416 3 contacts, 80.0ms
image 3/15 C:\Experimental\yolov5-master\testing_place\IR_3840.jpg: 320x416 1 contact, 79.9ms
image 4/15 C:\Experimental\yolov5-master\testing_place\IR_7249.jpg: 416x320 (no detections), 70.4ms
image 5/15 C:\Experimental\yolov5-master\testing_place\IR_7251.jpg: 320x416 1 contact, 1 radiator, 70.1ms
image 6/15 C:\Experimental\yolov5-master\testing_place\IR_7252.jpg: 416x320 (no detections), 70.3ms
image 7/15 C:\Experimental\yolov5-master\testing_place\IR_7266.jpg: 416x320 1 contact, 70.3ms
image 8/15 C:\Experimental\yolov5-master\testing_place\IR_7269.jpg: 320x416 (no detections), 79.8ms
image 9/15 C:\Experimental\yolov5-master\testing_place\IR_7270.jpg: 320x416 3 contacts, 80.5ms
image 10/15 C:\Experimental\yolov5-master\testing_place\IR_7284.jpg: 416x320 2 contacts, 65.2ms
image 11/15 C:\Experimental\yolov5-master\testing_place\IR_7289.jpg: 320x416 2 contacts, 70.0ms
image 12/15 C:\Experimental\yolov5-master\testing_place\IR_7437.jpg: 320x416 3 insulators, 1 contact, 70.2ms
image 13/15 C:\Experimental\yolov5-master\testing_place\IR_7497.jpg: 320x416 4 insulators, 3 contacts, 70.3ms
image 14/15 C:\Experimental\yolov5-master\testing_place\IR_7501.jpg: 320x416 1 insulator, 2 contacts, 80.5ms
image 15/15 C:\Experimental\yolov5-master\testing_place\IR_7503.jpg: 320x416 1 insulator, 3 contacts, 73.0ms
Speed: 0.0ms pre-process, 74.7ms inference, 2.7ms NMS per image at shape (1, 3, 416, 416)
Results saved to runs\detect\exp47
12 labels saved to runs\detect\exp47\labels
```

Рис. 4. Результат выполнения команды детектирования объектов на изображениях из тестовой папки; для каждого обработанного ИК-изображения присутствует запись о наличии обнаруженных образов, включая индикаторы их принадлежности к классу

Fig. 4. The result of command execution for object detection in images from the test folder; for each processed IR-image, there is a record of the presence of detected images, including indicators of their belonging to a class

Необходимо отметить, что для удобства восприятия данных здесь и далее в качестве примера тестовой выборки используются 15 изображений.

Для расчетов основных метрик оценки качества обучения модели нейросети YOLOv5 необходимо выяснить количество событий TP, FP, FN матрицы ошибок, соответствующее каждому изображению из тестовой выборки (табл. 1).

Таблица 1

Оценка наличия событий TP, FP, FN в тестовой выборке
Evaluation of the presence of TP, FP, FN events in the test sample

Номер/No	TP	FP	FN	Имя/Name
1	3	0	0	0724
2	3	0	0	1450
3	1	0	2	3840
4	0	0	3	7249
5	1	1	2	7251
6	0	0	3	7252
7	1	0	0	7266
8	0	0	0	7269
9	3	0	0	7270
10	1	0	0	7284
11	1	1	0	7289
12	4	0	1	7437
13	6	1	0	7497
14	4	0	3	7501
15	4	0	5	7503
Сумма	32	3	19	–

Результаты расчета метрик для оценки качества обучения модели нейросети YOLOv5 приведены ниже.

Доля объектов, которые названы алгоритмом распознавания положительными и при этом являются таковыми:

$$precision = \frac{32}{32 + 3} = 0,914.$$

Доля объектов, которые названы алгоритмом положительными из всех объектов положительного класса, которые этот алгоритм обнаружил:

$$recall = \frac{32}{32 + 19} = 0,627.$$

F-мера, которая представляет собой среднее гармоническое от значений двух критериев *precision* и *recall* (принимая значение весового коэффициента $\beta = 1$):

$$F_{\beta} = (1 + I^2) \cdot \frac{0,914 \cdot 0,627}{(I^2 \cdot 0,914) + 0,627} = 0,744.$$

Величина $F_{\beta} = 0,744$, что свидетельствует о способности модели успешно детектировать объекты.

В результате получена модель СНС, способная детектировать узлы электроустановок. Далее обученная модель YOLOv5 используется в разработанном авторами алгоритме, приведенном на рис. 1.

В рамках первого этапа СНС детектирует детали электроустановок на ИК-изображении: выделяет области, в которых находится различное оборудование. В результате создается *.txt файл с информацией о расположении и размерах граничных рамок или ярлыков (от англ. labels), определяет класс детектированного элемента (рис. 5).

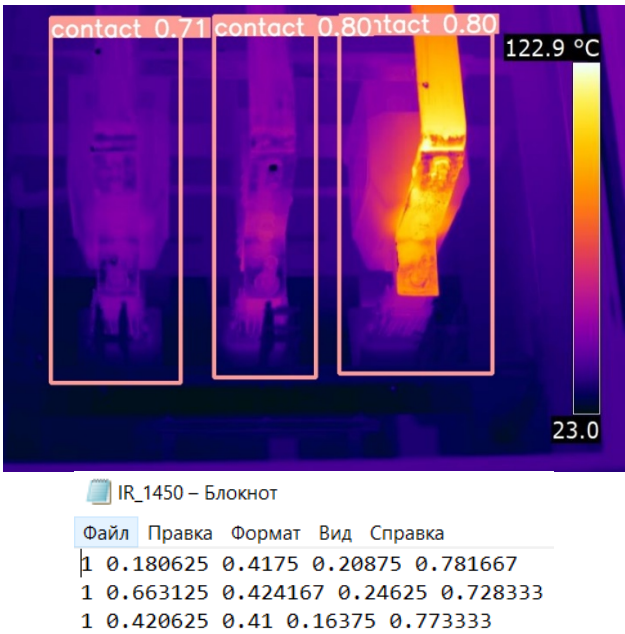


Рис. 5. Детектированное нейросетью YOLOv5 инфракрасное изображение трех контактных соединений; заметно превышение температуры правого контактного соединения над другими

Fig. 5. An infrared image of three contact joints detected by the YOLOv5 neural network; the temperature of the right contact joint is noticeably higher than others

Второй этап направлен на обработку данных, полученных при детектировании и из других внешних источников. Ключевым процессом является создание сумматрицы температуры детектированного объекта.

При представлении термограммы в виде матрицы температур по параметрам из файла *.txt выделяется субматрица, содержащая температуры внутри детектированной области. В конце этапа происходит поиск максимального значения температуры $T_{\text{макс.пкс}}$ для каждого детектированного

образа на ИК-снимке. Упрощенная реализация этого процесса представлена в Mathcad-документе (рис. 6).

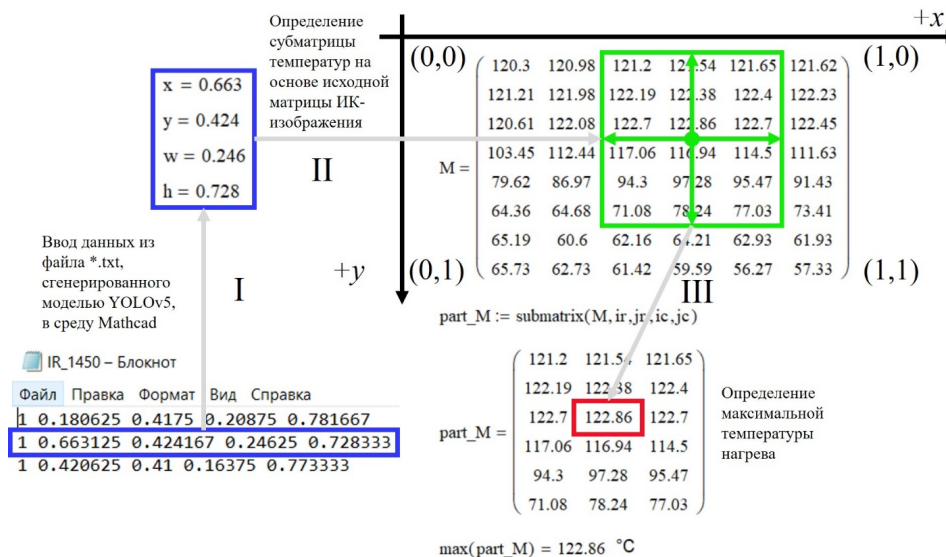


Рис. 6. Создание субматрицы по результатам детектирования YOLOv5: по параметрам из файла *.txt определяется максимальная температура объекта (фазы C)

Fig. 6. Creation of the submatrix based on YOLOv5 detection results: the maximum temperature of the object (phase C) is determined using parameters from the *.txt file

В рамках третьего этапа в зависимости от значений температур, полученных при пересчете по формулам (1) или (2), делается вывод о степени развития дефекта с учетом таблиц браковочных нормативов 4-2 и 4-3 из РД 153-34.0-20.363-99. На данном этапе также возможна проверка критерия превышения наибольшего допустимого значения температуры нагрева электрооборудования и токоведущих частей в соответствии с таблицей 4-1 РД 153-34.0-20.363-99 (на рис. 1 не показан).

Пересчет температуры осуществляется на примере ИК-изображения контактного соединения, которое было детектировано нейросетью YOLO (рис. 5). Для болтовых контактных соединений из меди, алюминия и их сплавов без покрытия в воздухе наибольшее допустимое значение температуры нагрева составляет $90 \text{ } ^\circ\text{C}$, а наибольшее допустимое значение превышения температуры $50 \text{ } ^\circ\text{C}$ при значении эффективной температуры окружающего воздуха, принимаемой равной $40 \text{ } ^\circ\text{C}$ [16].

В результате обработки субматрицы температур, соответствующей правому перегретому контактному соединению на рис. 5 (фазе C), была определена температура наиболее нагретого пикселя, равная $122,9 \text{ } ^\circ\text{C}$. Произведем сравнение величин температур: $T_{\text{пред.нагр}} = 90 \text{ } ^\circ\text{C} < T_{\text{макс.пкс}} = 122,9 \text{ } ^\circ\text{C}$. Очевидно, что температура наиболее нагретого пикселя превышает наибольшее допустимое значение температуры нагрева ($T_{\text{пред.нагр}}$ – предельная тем-

пература нагрева по таблице 4-1 РД 153-34.0-20.363–99), что однозначно свидетельствует о наличии дефекта в фазе С.

Рассмотрим фазу А (крайний левый контакт на рис. 5) с температурой наиболее нагретого пикселя, равной 46,7 °С. Температура окружающего воздуха принимается равной 23,0 °С. Пересчитаем нормированное значение превышения температуры при номинальной нагрузке. Предположим, что контакт находится под нагрузкой 80 % от номинальной:

$$\Delta T_{\text{ном ф.А}} = \Delta T_{\text{раб ф.А}} \cdot \left[\frac{I_{\text{ном}}}{I_{\text{раб}}} \right]^2 = (46,7 - 23) \cdot \left[\frac{100}{80} \right]^2 = 37 \text{ } ^\circ\text{С}. \quad (7)$$

Превышение температуры фазы А в этом случае составляет 37,0 °С, что позволяет классифицировать указанное контактное соединение как дефектное со степенью неисправности 2 в соответствии с таблицей 4-2 РД 153-34.0-20.363–99 (развившийся дефект, учащенный контроль 1 раз в месяц, устранение дефекта при первой необходимости) [16].

Новизна предложенного авторами решения заключается в снижении влияния человеческого фактора за счет автоматического детектирования оборудования сверточной нейронной сетью YOLOv5 и пересчета критериев оценки в зависимости от токовой нагрузки, что позволяет выявить не только развившиеся дефекты, но и обнаружить начальную стадию возникновения неисправностей.

ВЫВОДЫ

1. Предложенная математическая модель системы критериев оценки требует фиксирования не только данных, полученных из ИК-изображений электросетевого оборудования, но и токовой нагрузки и температуры окружающего воздуха для пересчета $\Delta T_{\text{ном}}$ или $\Delta T_{0,5}$ узла электроустановки или контактного соединения.

2. Разработанный алгоритм обработки термограмм электрооборудования на базе СНС YOLOv5 позволяет автоматизировать детектирование объектов на изображениях, найти температуру наиболее нагретой точки и определить наличие дефекта, а также степень неисправности оборудования.

3. Программная реализация разработанного алгоритма обеспечивает возможность обработки больших объемов данных и сокращает время анализа результатов ИК-диагностики. Это способствует увеличению частоты проведения актов контроля и повышению надежности работы электрооборудования.

4. Обученная на пользовательском наборе данных сверточная нейронная сеть обладает метриками: $precision = 0,914$, $recall = 0,627$ и $F_\beta = 0,744$, что свидетельствует о ее высокой эффективности в задаче детектирования объектов на термограммах оборудования электрических сетей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г., № 1523-р // Министерство энергетики РФ. URL: <https://minenergo.gov.ru/ministry/energy-strategy> (дата обращения: 26.09.2024).
2. Реклоузер SMART 35 – Статистические данные по сетям и центрам питания 35 кВ в России // Elec.ru – электротехнический интернет-портал. URL: <https://www.elec.ru/viewer?url=/files/2017/05/03/Reklouzer-SMART35.pdf> (дата обращения: 26.09.2024).
3. Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций / А. И. Хальясмаа, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин, Д. А. Глушков. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 64 с.
4. Секретарев, Ю. А. Модели текущего технического состояния электрооборудования для расчета надежности систем электроснабжения монопотребителей в рамках риск-ориентированного подхода / Ю. А. Секретарев, А. А. Горшунов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 1. С. 17–34. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-17-34>.
5. Хлебцов, А. П. Развитие методов и устройств диагностики силового электрооборудования трансформаторных подстанций / А. П. Хлебцов, Л. Х. Зайнутдинова, А. Н. Шилин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2020. Т. 16, № 3. С. 14–27. <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2020-16-3-14-27>.
6. Кувшинов, А. А. Диагностика технического состояния электрооборудования в системах электроснабжения: учеб. пособие / А. А. Кувшинов, В. П. Тараканов. Тольятти: ТГУ, 2016. 90 с.
7. Сви, П. М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения / П. М. Сви. М.: Энергоатомиздат, 1992. 240 с.
8. Максудов, Д. В. Методы селекции сигналов частичных разрядов в изоляции силовых трансформаторов / Д. В. Максудов, Е. М. Федосов // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 12, № 2. С. 138–143.
9. Вдовико, В. П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования / В. П. Вдовико. М.: Наука, 2007. 156 с.
10. Кучинский, Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях / Г. С. Кучинский. Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1979. 224 с.
11. Гавриленко, А. В. Методика вибрационного обследования силовых трансформаторов / А. В. Гавриленко, А. П. Долин. URL: https://megaom.ucoz.ru/_ld/0/40____.pdf.
12. Пузина, Е. Ю. Системы мониторинга силовых трансформаторов тяговых подстанций / Е. Ю. Пузина, А. Г. Туйгунова, И. А. Худоногов. Иркутск: ИрГУПС, 2020. 184 с.
13. Вавилов, В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В. П. Вавилов. М.: ИД Спектр, 2009. 544 с.
14. Власенко, С. А. Мониторинг и диагностика болтовых электрических соединений системы тягового электроснабжения: монография / С. А. Власенко, И. В. Игнатенко. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2022. 107 с.
15. Коренчиак, Д. Тепловое измерение и его применение для диагностики масляных трансформаторов распределительных сетей. / Д. Коренчиак, М. Себок, М. Гуттен // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 6. С. 583–594. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-583-594>.
16. РД 153-34.0-20.363–99 Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ. М.: СПО ОРГРЭС, 2001. 136 с.
17. РД 34.45-51.300–97 Объем и нормы испытаний электрооборудования. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. 256 с.
18. Величко, В. А. Предложения по совершенствованию системы критериев оценки состояния электрооборудования по результатам инфракрасного контроля / В. А. Величко, А. Д. Чернова // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники: материалы V Всерос. науч.-практ. (с междунар. участием) конф., посвящ. празднованию 55-летия КГЭУ. Казань: КГЭУ, 2023. Т. 2. С. 219–228.

19. Лебедь, Н. И. Имитационное моделирование автоматизированных систем управления технологических процессов в электроэнергетике и АПК / Н. И. Лебедь. Волгоград: ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, 2022. 88 с.
20. Standard for Infrared Inspection of Electrical Systems & Rotating Equipment. NJ: Infraspection Institute, 2016. URL: <https://www.atlanticleak.com/wp-content/uploads/2019/08/Standard-for-Infrared-Inspection-of-Electrical-systems-and-Rotating-Equipment.pdf> (date of access 26.09.2024).
21. Kim, J. S. Infrared Thermal Image-Based Sustainable Fault Detection for Electrical Facilities / J. S. Kim, K. N. Choi, S. W. Kang // *Sustainability*. 2021. Vol. 13, № 2. P. 557. <https://doi.org/10.3390/su13020557>.
22. Xu, F. Research on Power Equipment Troubleshooting Based on Improved AlexNet Neural Network / F. Xu, S. Liu, and W. Zhang // *Journal of Measurements in Engineering*. 2024. Vol. 12, No 1. P. 162–182. <https://doi.org/10.21595/jme.2023.23786>.
23. Wu, J. An Infrared Image Detection of Power Equipment Based on Super-Resolution Reconstruction and YOLOv4 / J. Wu, X. Li, Y. Zhou // *The Journal of Engineering*. 2022. Vol. 2022, No 10. P. 1006–1016. <https://doi.org/10.1049/tje2.12187>.
24. Efficient Real-Time Detection of Electrical Equipment Images Using a Lightweight Detector Model / C. Qi, Z. Chen, X. Chen [et al.] // *Frontiers in Energy Research*. 2023. Vol. 11. P. 1291382. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1291382>.
25. Electric Substation Inspection: YOLOv5 in Hotspot Detection Through Thermal Imaging / D. A. Pérez-Aguilar, J. M. Pérez-Aguilar, A. P. Pérez-Aguilar [et al.] // *Ingenius, Revista Ciencia y Tecnología*. 2024. Vol. 31. P. 43–54. <https://doi.org/10.17163/ings.n31.2024.04>.
26. 王媛彬. 基于自适应特征融合和注意力机制的变电设备红外图像识别 / 王媛彬, 吴冰超 // *电子与信息学报*. 2024. Vol. 46, No 9. P. 3749–3756 = Wang, Y., Infrared Image Recognition of Substation Equipment Based on Adaptive Feature Fusion and Attention Mechanism / Y. Wang, B. Wu // *Journal of Electronics & Information Technology*. 2024. Vol. 46, No 9. P. 3749–3756. <https://doi.org/10.11999/JEIT231047>.
27. Ahmed, K. R. Smart Pothole Detection Using Deep Learning Based on Dilated Convolution / K. R. Ahmed // *Sensors*. 2021. Vol. 21, No 24. P. 8406. <https://doi.org/10.3390/s21248406>.
28. Величко, В. А. Программная реализация алгоритма по автоматизации тепловизионной диагностики оборудования подстанций с использованием нейросети YOLOv5 / В. А. Величко, А. Д. Косенко // *Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всерос. науч.-метод. конф., Оренбург, 01–03 февр. 2024 г. Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2024. С. 1209–1214.*
29. Чернова, А. Д. Разметка изображений элементов электроустановок для обучения нейросети YOLOv5 / А. Д. Чернова, В. А. Величко // *Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: материалы XIV Всероссийской науч.-техн. конф., Оренбург. Оренбург: Оренбург. гос. ун-т, 2023. С. 217–222.*
30. Ярышев, С. Н. Технологии глубокого обучения и нейронных сетей в задачах видеоанализа / С. Н. Ярышев, В. А. Рыжова. СПб.: Ун-т ИТМО, 2022. 82 с.
31. Обучение YOLOv5 на пользовательских данных // *Ultralytics*. URL: https://docs.ultralytics.com/yolov5/tutorials/train_custom_data/ (дата обращения: 11.01.2024).
32. Gomed, E. The Significance of Train-Validation-Test Split in Machine Learning / E. Gomed // *Medium*. URL: <https://medium.com/@evertongomed/the-significance-of-train-validation-test-split-in-machine-learning-91ee9f5b98f3>. Publ. date: 28.08.2023.

Поступила 20.12.2024 Подписана в печать 26.02.2025 Опубликовано онлайн 31.07.2025

REFERENCES

1. The Energy Strategy of the Russian Federation for the Period up to 2035 Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation, June 9, 2020, No 1523-R. *Ministry of Energy of the Russian Federation*. Available at: <https://minenergo.gov.ru/ministry/energy-strategy> (accessed 26 September 2024) (in Russian).

2. SMART 35 Recloser: An Innovative Solution for Upgrading Power Centers and Improving the Reliability of 35 kV Networks. *Elec.ru – Electrotechnical Internet Portal*. Available at: <https://www.elec.ru/viewer?url=/files/2017/05/03/Reklouzer-SMART35.pdf> (accessed 26 September 2024) (in Russian).
3. Khalyasmaa A. I., Dmitriev S. A., Kokin S. E., Glushkov D. A. (2015) *Diagnostics of Electrical Equipment of Power Stations and Substations*. Ekaterinburg, Ural University Publishing House, 64 (in Russian).
4. Sekretarev Yu. A., Gorshunov A. A. (2025) Models of the Current Technical Condition of Electrical Equipment for Calculating the Reliability of Power Supply Systems for Single-Users within the Framework of a Risk-Based Approach. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 68 (1), 17–34. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-1-17-34> (in Russian).
5. Khlebtsov A. P., Zainutdinova L. KH., Shilin A.N. (2020) Development of Methods and Devices for Diagnostics of Power Electrical Equipment of Transformer Substations; *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy = Electrical and data processing facilities and systems*, 16 (3), 14–27. <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2020-16-3-14-27> (in Russian).
6. Kuvshinov A. A., Tarakanov V. P. (2016) *Diagnostics of the Technical Condition of Electrical Equipment in Power Supply Systems*. Togliatti, Togliatti State University. 90 (in Russian).
7. Svi P. M. (1992) *Methods and Means of Diagnostics of High Voltage Equipment*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 240 (in Russian).
8. Maksudov D. V., Fedosov E. M. (2009) Methods of Selection of Partial Discharge Signals in Isolation of Power Transformers. *Vestnik USATU*, 12 (2), 138–143 (in Russian).
9. Vdoviko V. P. (2007) *Partial Discharges in the Diagnosis of High-Voltage Equipment*. Moscow, Nauka Publ. 156 (in Russian).
10. Kuchinskiy G. S. (1979) *Partial Discharges in High Voltage Structures*. Leningrad, Energiya Publ., Leningrad Branch. 224 (in Russian).
11. Gavrilenko A. V., Dolin A. P. (2004) Technique of Vibration Inspection of Power Transformers. Available at: https://megaom.ucoz.ru/_ld/0/40_____.pdf (in Russian).
12. Puzina E. Yu., Tuygunova A. G., Khudonogov I. A. (2020) *Systems of Monitoring of Power Transformers of Traction Substations*. Irkutsk, Irkutsk State Transport University (IrGUPS). 184 (in Russian).
13. Vavilov V. P. (2009) *Infrared Thermography and Thermal Control*. Moscow, Spektr Publishing House. 544 (in Russian).
14. Vlasenko S. A., Ignatenko I. V. (2022) *Monitoring and Diagnostics of Bolted Electrical Connections of the Traction Power Supply System*. Khabarovsk, Far Eastern State Transport University (FESTU) Publishing House. 107 (in Russian).
15. Korenciak D., Sebok M., Gutten M. (2019) Thermal Measurement and its Application for Diagnostics of Distribution Oil Transformers. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (6), 583–594. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-583-594> (in Russian).
16. RD [Guidance Document] 153-34.0-20.363-99. *Method for Infrared Inspection of Electrical Equipment and Overhead Lines*. Moscow, SPO ORGRES, 2001. 136 (in Russian).
17. RD [Guidance Document] 34.45-51.300-97. *Scope and Standards for Tests of Electrical Equipment*. Moscow, IC ENAS Publishing House, 2004. 256 (in Russian).
18. Velichko V. A., Chernova A. D. (2023) Proposals for Improving the Criteria System for Assessing the Condition of Electrical Equipment Based on the Results of Infrared Control. *Problemy i perspektivy razvitiya elektroenergetiki i elektrotekhniki: materialy V Vseros. nauch.-prakt. (s mezhdunar. uchastiem) konf., posvyashch. prazdnovaniyu 55-letiya KGEU. T. 2 [Problems and Prospects of Development of the Electric Power Industry and Electrical Engineering]*: Proceedings V All-Russian Scientific and Practical Conference (with International

- Participation) Dedicated to the Celebration of the 55th Anniversary of the KGEU. Vol. 2]. Kazan, Kazan StatePower Engineering University, 219–228 (in Russian).
19. Lebed' N. I. (2022) *Simulation Modeling of Automated Control Systems for Technological Processes in the Electric Power Industry and the Agro-industrial Complex*. Volgograd, Volgograd State Agrarian University Publ. 88 (in Russian).
20. *Standard for Infrared Inspection of Electrical Systems & Rotating Equipment*. NJ, Infraspection Institute, 2016. Available at: <https://www.atlanticleak.com/wp-content/uploads/2019/08/Standard-for-Infrared-Inspection-of-Electrical-systems-and-Rotating-Equipment.pdf> (accessed 26 September 2024).
21. Kim J. S., Choi K. N., Kang S. W. (2021) Infrared Thermal Image-Based Sustainable Fault Detection for Electrical Facilities. *Sustainability*, 13 (2), 557. <https://doi.org/10.3390/su13020557>.
22. Xu F., Liu S., Zhang W. (2024) Research on Power Equipment Troubleshooting Based on Improved AlexNet Neural Network. *Journal of Measurements in Engineering*, 12 (1), 162–182, <https://doi.org/10.21595/jme.2023.23786>.
23. Wu J., Li X., Zhou Y. (2022) An infrared image detection of power equipment based on super-resolution reconstruction and YOLOv4. *The Journal of Engineering*, 2022, 1006–1016. <https://doi.org/10.1049/tje2.12187>.
24. Qi C., Chen Z., Chen X., Bao Y., He T., Hu S., Li J., Liang Y., Tian F., Li M. (2023). Efficient Real-time Detection of Electrical Equipment Images Using a Lightweight Detector Model. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1291382. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1291382>.
25. Pérez-Aguilar D. A., Pérez-Aguilar J. M., Pérez-Aguilar A. P., Risco-Ramos R. H., Malpica-Rodríguez M. E. (2024) Electric Substation Inspection: YOLOv5 in Hotspot Detection Through Thermal Imaging. *Ingenius. Revista Ciencia y Tecnología*, 31, 43–54. <https://doi.org/10.17163/ings.n31.2024.04>.
26. Wang Y., Wu B. (2024) Infrared Image Recognition of Substation Equipment Based on Adaptive Feature Fusion and Attention Mechanism. *Journal of Electronics & Information Technology*, 46 (9), 3749–3756 (in Chinese). <https://doi.org/10.11999/JEIT231047>.
27. Ahmed K. R. (2021). Smart Pothole Detection Using Deep Learning Based on Dilated Convolution. *Sensors*, 21 (24), 8406. <https://doi.org/10.3390/s21248406>.
28. Velichko V. A., Kosenko A. D. (2024) Software Implementation of an Algorithm for Automating Thermal Imaging Diagnostics of Substation Equipment Using the YOLOv5 Neural Network. *Universitetskii kompleks kak regional'nyi tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury: materialy Vseros. nauch.-metod. konf., Orenburg, 01–03 fevr. 2024 g.* [University Complex as a Regional Center of Education, Science and Culture. Proceedings of the All-Russian Scientific and Methodological Conference, Orenburg, 01–03 February 2024.]. Orenburg, Orenburg State University, 1209–1214 (in Russian).
29. Chernova A. D., Velichko V. A. (2023) Markup of Images of Electrical Installation Elements for Training the YOLOv5 Neural Network. *Energetika: sostoyanie, problemy, perspektivy: materialy XIV Vserossiiskoi nauch.-tekhn. konf., Orenburg* [Power Engineering: State, Problems, Prospects: Proceedings of the XIV All-Russian Scientific and Technical Conference]. Orenburg, Orenburg State University, 217–222 (in Russian).
30. Yaryshev S. N., Ryzhova V. A. (2022) *Deep Learning and Neural Network Technologies in Video Analysis Tasks*. St. Petersburg, ITMO University. 82 (in Russian).
31. Train YOLOv5 on Custom Data. *Ultralytics*. Available at: https://docs.ultralytics.com/yolov5/tutorials/train_custom_data/ (accessed 11 January 2024) (in Russian).
33. Gomede E. (28 August 2023) The Significance of Train-Validation-Test Split in Machine Learning. *Medium*. Available at: <https://medium.com/@evertongomede/the-significance-of-train-validation-test-split-in-machine-learning-91ee9f5b98f3>.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-343-352>

УДК 621.311.22:005.93+620.97

Использование дымовых газов котла для абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов системы регенеративного подогрева подпиточной воды

В. В. Янчук¹⁾, В. Н. Романюк¹⁾

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

Реферат. Повышение эффективности использования первичных энергоресурсов при производстве тепловой и электрической энергии на тепловых электроцентралях (ТЭЦ) – непрерывная задача в контексте снижения себестоимости производства преобразованных энергопотоков и улучшения экологических характеристик энергогенерирующей установки. Для решения обозначенной задачи предложено развитие системы регенеративного подогрева питательной воды за счет использования сбросных низкотемпературных тепловых потоков ТЭЦ, что возможно с интеграцией в тепловую схему станции утилизационных теплоиспользующих тепловых насосов. В данной работе рассмотрено применение упомянутых абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов (АБТН), для которых в качестве греющего теплового потока используются дымовые газы, отбираемые из тракта парового котла, в качестве источника низкопотенциальной энергии – поток циркуляционной воды конденсатора. В зависимости от функции цели при оптимизации режима работы электростанции в соответствии с требованиями энергосистемы после модернизации возможно снижение электрической мощности турбоустановки, увеличение либо ее сохранение на прежнем уровне. Для каждого из трех вариантов проведен численный эксперимент для турбоагрегата ПТ-60, наиболее распространенного в Белорусской объединенной энергетической системе. Для варианта со снижением электрической мощности получены следующие результаты: рост электрического, энергетического и эксергетического КПД соответственно составил 4,3, 2,6 и 1,1 %, при этом также снижается температура уходящих дымовых газов за счет их более глубокого охлаждения до 110 °С. В работе определено сечение газозвоздушного тракта котлоагрегата для отбора дымовых газов с температурой, обеспечивающей работу абсорбционного теплового насоса на номинальных параметрах. Отработанные в АБТН дымовые газы перед сбросом в дымовую трубу смешиваются с потоком дымовых газов непосредственно от котла.

Ключевые слова: низкопотенциальные тепловые потоки, абсорбционный тепловой насос с газовым приводом, система подогрева питательной воды ТЭЦ

Для цитирования: Янчук, В. В. Использование дымовых газов котла для абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов системы регенеративного подогрева подпиточной воды / В. В. Янчук, В. Н. Романюк // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 4. С. 343–352. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-343-352>

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

The Use of Boiler Flue Gases for Absorption Lithium Bromide Heat Pumps in the System of Regenerative Heating of Make-up Water

V. V. Yanchuk¹⁾, V. N. Romaniuk¹⁾,

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

Abstract. Increasing the efficiency of primary energy sources use in the production of heat and electricity at thermal power plants is an enduring task in the context of reducing the cost of converted energy flows production and improving the environmental characteristics of a power generating unit. To solve this problem, it is proposed to develop a system for regenerative heating of feedwater via the use of low-temperature waste heat flows from a thermal power plant, which is possible with the integration of heat-recovery heat pumps into the thermal scheme of the station. In this paper, we consider the use of the aforementioned lithium bromide absorption heat pumps driven by flue gases extracted from the steam boiler path and the circulating water stream of the condenser is used as a source of low-potential energy. Depending on the efficiency function, when optimizing the operating mode of the power plant in accordance with the requirements of the power system after modernization, it is possible to reduce the electric power of the turbine, increase it or maintain it at the same level. For each of the three variants, a numerical experiment was conducted for the PT-60 turbine unit, which is the most common in the unified Belarusian Energy System. For the option with a decrease in electrical power, the following results were obtained: an increase in electrical, energy and exergetic efficiency, respectively, amounted to 4.3, 2.6 and 1.1 %, while also reducing the temperature of outgoing flue gases due to their deeper cooling to 110 °C. The paper determines the cross-sections of the gas-air duct of the boiler unit for the selection of flue gases with a temperature that ensures the operation of the absorption heat pump at nominal parameters. The flue exhaust gases of the lithium bromide absorption heat pumps are mixed with the flue gas stream directly from the boiler before being discharged into the smokestack.

Keywords: low-potential heat flows, gas-driven absorption heat pump, CHP feedwater heating system

For citation: Yanchuk V. V., Romaniuk V. N. (2025) The Use of Boiler Flue Gases for Absorption Lithium Bromide Heat Pumps in the System of Regenerative Heating of Make-up Water. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (4), 343–352. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-343-352> (in Russian)

Введение

Повышение эффективности использования первичных энергоресурсов – один из путей достижения целей устойчивого развития [1–4]. При выработке механической энергии часть подведенной теплоты рассеивается в окружающую среду (в соответствии со вторым законом термодинамики). Для повышения коэффициента полезного действия данного преобразования энергии при имеющихся место значениях предельных температур цикла целесообразно рассмотреть снижение доли энергии, передаваемой в окружающую среду, например посредством регенерации теплоты. Вместе с тем низкотемпературные тепловые потоки напрямую невозможно вовлечь непосредственно в процесс регенерации. Требуется повысить их температурный уровень, что возможно с помощью теплоиспользующих тепловых насосов при их интеграции в процесс регенерации теплоты в цикле.

В энергосистеме Республики Беларусь в 2023 г. порядка 70 % всей электроэнергии было выработано за счет сжигания органического топлива [5] на тепловых электрических станциях, где имеются значительные мощности низкопотенциальных сбросных тепловых потоков в виде циркуляционной воды конденсатора, теплоты охлаждения технологических по-

токов, отходящих дымовых газов. С вводом АЭС ситуация несколько изменилась, но актуальность рассматриваемой задачи сохранилась.

Возможность утилизации низкопотенциальных сбросных тепловых потоков на тепловых электроцентралях (ТЭЦ) с производственным отбором пара уже рассматривалась ранее применительно к ТЭЦ с установленными паровыми турбинами типа ПТ-60 и значительными невозвратами конденсата производственного отбора [6]. В соответствии с работой [6], подпиточная вода, поступающая для восполнения потерь конденсата у потребителей пара производственного отбора, в ходе предварительной обработки нагревается в абсорбционном бромисто-литиевом тепловом насосе (АБТН) до 85 °С за счет энергии циркуляционной воды и пара, поступающего из отборов турбины для привода АБТН. Этим достигается регенерация низкопотенциальной теплоты пара, поступающего в конденсатор турбины. В результате такой модернизации производственных ТЭЦ увеличение электрического КПД составило 0,90 % для варианта со снижением выработки электрической энергии, что актуально в Белорусской энергосистеме с вводом в строй АЭС, и сохранением минимального пропуска пара в конденсатор. Рост энергетического КПД при этом составил 0,55 %, эксергетический КПД увеличился на 0,23 %, что показало перспективность подобного решения и вызвало поиски путей повышения достигаемых результатов.

Использование низкопотенциальных сбросных тепловых потоков с применением АБТН требует затрат тепловой энергии на компенсацию передачи теплоты от холодного источника к системе с более высокой температурой. В упомянутой работе [6] для этой цели использовался пар из отборов турбины. Но на станции имеются также иные теплоносители требуемой температуры, например частично отработанные продукты сгорания топлива с достаточно высокими температурами, которые позволяют использовать эти дымовые газы для обеспечения работы теплоиспользующего теплового насоса. В данной работе рассмотрен вариант подогрева указанного потока подпиточной воды в АБТН, работающем на дымовых газах, отбираемых из газовоздушного тракта парового котлоагрегата.

Основная часть

Паровые турбины типа ПТ-60 обычно работают с паровыми котлоагрегатами БКЗ-210, БКЗ-320, БКЗ-420. Температуры уходящих из указанных котлоагрегатов дымовых газов в соответствии с режимными картами лежат в диапазоне порядка 110–140 °С. На рис. 1 представлена зависимость температуры уходящих газов от нагрузки котлоагрегата для котла БКЗ-420 при работе на природном газе. Для обеспечения работы теплового насоса абсорбционного типа с приводом дымовыми газами требуемая температура греющего потока газов на входе в АБТН должна составлять 300–600 °С, при этом охлаждение дымовых газов осуществляется до температуры порядка 140–150 °С с сохранением высоких коэффициентов преобразования [7, 8]. Для данных интервалов рабочих температур дымовых газов отопительный коэффициент (коэффициент преобразования) COP АБТН составляет 1,7 [7]. На рис. 2 представлена диаграмма преобразования потоков АБТН при данном отопительном коэффициенте в расчетном режиме.

Выбор температуры дымовых газов, отбираемых из тракта котла на привод АБТН, осуществляется с учетом сохранения отопительного коэффициента АБТН не ниже 1,7 и минимизации изменений в работе котла.

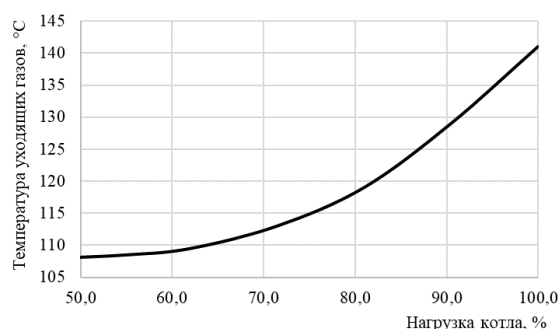


Рис. 1. Температура уходящих газов в зависимости от нагрузки котлоагрегата БКЗ-420

Fig. 1. Exhaust gas temperature depending on the load of the BKZ-420 boiler unit

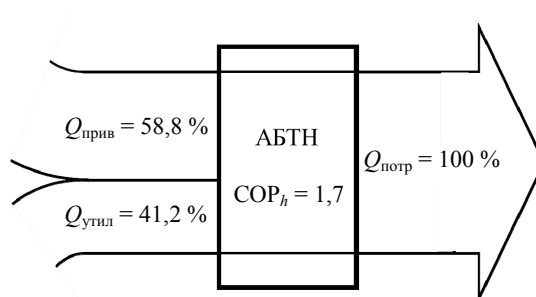


Рис. 2. Диаграмма потоков тепловой энергии в АБТН:

$Q_{прив}$ – поток тепловой энергии привода; $Q_{утил}$ – поток утилизируемой низкотемпературной тепловой энергии; $Q_{потр}$ – поток тепловой энергии потребителю

Fig. 2. Diagram of thermal energy flows in the lithium bromide absorption heat pumps:

$Q_{прив}$ is the flow of thermal energy of the drive; $Q_{утил}$ is the flow of recyclable low-temperature thermal energy; $Q_{потр}$ is the flow of thermal energy to the consumer

Часть дымовых газов, как уже указывалось, из тракта парового котлоагрегата предлагается отбирать на привод АБТН. Структурная схема взаимного расположения поверхностей нагрева хвостовой части котлоагрегата представлена на рис. 3.

В соответствии с указанными ранее требованиями АБТН к температуре входного потока дымовых газов и распределению температур по тракту парового котлоагрегата место отбора дымовых газов на АБТН принято между воздухоподогревателем (ВЗП) II ступени и водяным экономайзером (ВЭК) I ступени. В этом сечении дымового тракта котлоагрегата температура дымовых газов составляет 401 °C в расчетном режиме и изменяется незначительно при изменении нагрузки котла.

Расход дымовых газов через последующие поверхности нагрева котлоагрегата в связи с указанным отбором дымовых газов на привод АБТН снизится на 10–15 %. В связи с отмеченным уменьшением расхода дымовых газов через хвостовые поверхности (ВЭК I и ВЗП I) парового котла температура продуктов сгорания будет изменяться не только в последующих, но и во всех характерных сечениях по тракту дымовых газов, что учтено в расчете показателей работы котла, АБТН и всей схемы.

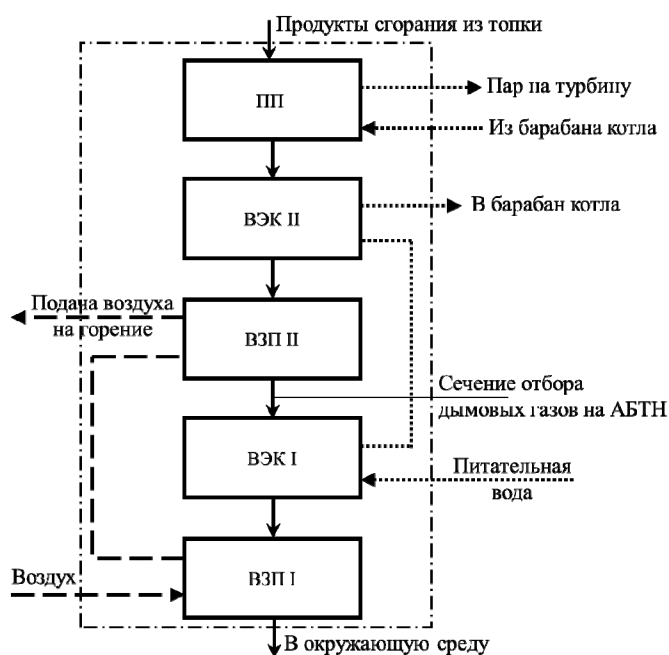


Рис. 3. Поверхности нагрева котельной установки БКЗ-420:

ПП – пароперегреватели I–IV ступеней; ВЭК I, ВЭК II – водяной экономайзер I, II ступени соответственно; ВЗП I, ВЗП II – воздухоподогреватель I, II ступени соответственно

Fig. 3. Heating surfaces of the BKZ-420 boiler: ПП – steam superheaters of I–IV stages, respectively; ВЭК I, ВЭК II – water economizer of I, II stages, respectively, ВЗП I, ВЗП II – air heater of I, II stages, respectively

Охлажденные в АБТН до 140–150 °С дымовые газы далее смешиваются с основным потоком дымовых газов, выходящих из котла. При этом температура потока незначительно, порядка 5 °С, повышается и далее дымовые газы сбрасываются в дымовую трубу.

Методика расчета

Составленная расчетная модель была верифицирована по энергетическим характеристикам котлоагрегата БКЗ-420-140, работающего на природном газе. Расчет проводился методом последовательных приближений.

Перерасчет температур по тракту дымовых газов парового котла после модернизации осуществлялся на основании двух уравнений – теплового баланса и теплопередачи:

$$Q = V_n \overline{c'_p} \Big|_{t_1}^{t_2} \Delta t;$$

$$Q = KF \Delta \overline{t},$$

где Q – тепловая мощность потока теплоты, передаваемая через поверхность теплообмена, Вт; V_n – объемный расход дымовых газов через поверхность (при нормальных условиях), м³/с; $\overline{c'_p} \Big|_{t_1}^{t_2}$ – удельная объемная изо-

барная теплоемкость (средняя в интервале температур), Дж/(м³·°C); Δt – разность температур дымовых газов на входе и выходе из теплообменника, °C; K – коэффициент теплопередачи поверхности нагрева, Вт/(м²·°C); F – площадь поверхности теплопередачи, м²; $\Delta \bar{t}$ – среднелогарифмический температурный напор по поверхности теплообмена, °C.

При изменении температуры дымовых газов соответственно изменяется тепловая мощность поверхности нагрева, следовательно, изменяются также и температуры нагреваемого потока.

В общем случае коэффициент теплопередачи изменяется при варьировании скорости движения среды (из-за изменения расхода в данном случае) и ее температуры. При расчете данным изменением пренебрегаем ввиду его малости (наибольшее изменение температуры наблюдается на выходе из последних поверхностей нагрева: ВЭК I ступени, ВЗП I ступени). При полном невозврате конденсата производственного отбора в цикл снижение температуры уходящих дымовых газов после ВЗП I составляет 27 °C, что будет иметь малое влияние при переопределении физических свойств среды. Конструкция теплообменных поверхностей остается неизменной, соответственно принято, что $KF \approx \text{const}$.

В расчете также принято, что температуры питательной воды и получаемого в котле перегретого пара не изменяются и составляют соответственно 230 и 550 °C. Расход нагреваемой среды также принят постоянным.

В результате данной модернизации уменьшается температура подогрева подаваемого на горение воздуха в зависимости от расхода подпитки. При полном невозврате конденсата снижение составляет ≈ 12 °C, снижаются температура питательной воды после двух ступеней водяного экономайзера на ≈ 3 °C и температура уходящих дымовых газов на входе в дымовую трубу в пределах до ≈ 110 °C. Данное изменение температуры дымовых газов не является критичным для обеспечения нормальной работы дымовой трубы. Температура уходящих дымовых газов соответствует диапазону температур, указанному в режимной карте данного котла (табл. 1).

Таблица 1

Температуры дымовых газов в характерных сечениях котла до и после модернизации
Flue gas temperatures in typical boiler sections before and after modernization

Точка сечения	Температура дымовых газов	
	до установки АБТН, °C	после установки АБТН, °C
После пароперегревателей	832	823
После ВЭК II	497	491
После ВЗП II	401	389
После ВЭК I	299	284
После ВЗП I	133	105

Полученные результаты

Как и для варианта с паровым приводом АБТН [6], в данной работе рассматривались три возможных варианта изменения режима работы ТЭЦ:

– с сохранением расхода пара в голову турбины, что также позволяет увеличить выработку электрической энергии после модернизации. В дан-

ном случае при полном невозврате конденсата производственного отбора рост электрической мощности составляет 3,06 МВт;

– с сохранением электрической мощности. В этом случае снижение расхода свежего пара в голову турбины после модернизации при полном невозврате конденсата производственного отбора в цикл составляет 6,68 т/ч;

– с сохранением минимального пропуса пара в конденсатор. Одновременное уменьшение расхода свежего пара на турбину со снижением электрической мощности на 8,85 т/ч и 0,91 МВт при полном невозврате конденсата в цикл соответственно.

Оценку эффективности проводимой модернизации производили по группе показателей [10]:

– электрическому КПД

$$\eta_{эл} = \frac{W_{эз}}{Q_{топл} - Q_{то} - Q_{по}};$$

– энергетическому КПД

$$\eta_{эн} = \frac{W_{эз} + Q_{то} + Q_{по}}{Q_{топл}};$$

– эксергетическому КПД

$$\eta_e = \frac{\sum E''}{\sum E'} = \frac{E_{потр}}{E_{прив} + E_{утил}},$$

где $W_{эз}$ – электрическая выработка турбоустановки, ГДж/ч; $Q_{то}$ – тепловая нагрузка теплофикационного отбора, ГДж/ч; $Q_{по}$ – то же производственного отбора, ГДж/ч; $Q_{топл}$ – мощность потока топлива, ГДж/ч; E'' – эксергия выходящего из теплового насоса потока, ГДж/ч; E' – то же входящего в тепловой насос потока, ГДж/ч; $E_{потр}$ – то же потока к потребителю, ГДж/ч; $E_{прив}$ – то же потока привода, ГДж/ч; $E_{утил}$ – то же утилизируемого потока, ГДж/ч.

Полученные результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Изменение показателей эффективности в зависимости
от функции цели предлагаемой модернизации**

**Change in performance indicators depending on the function and purpose
of the proposed modernization**

Показатель эффективности	Увеличение электрической мощности	Сохранение электрической мощности	Снижение электрической мощности
Рост электрического КПД, %	4,4	4,2	4,3
Рост энергетического КПД, %	2,0	2,4	2,6
Рост эксергетического КПД, %	1,3	1,2	1,1

Из таблицы видно, что рост электрического КПД для всех описанных вариантов в пределе (при полном невозврате конденсата производственного отбора в цикл) лежит в пределах 4,2–4,4 %. Наибольшее увеличение энергетического КПД (2,6 %) получено в варианте с сохранением мини-

мального пропуска пара в конденсатор. Максимальный рост эксергетической эффективности характерен для варианта с увеличением выработки электрической энергии и при полном невозврате конденсата составляет 1,3 %.

Для текущей ситуации в Белорусской объединенной энергетической системе с превышением производства электрической энергии над потреблением в периоды ночного провала наиболее рациональным является вариант со снижением электрической мощности ТЭЦ, соответственно с сохранением минимального пропуска пара в конденсатор 12 т/ч. На рис. 4 приведены зависимости роста показателей эффективности от процента возврата конденсата производственного отбора в цикл.

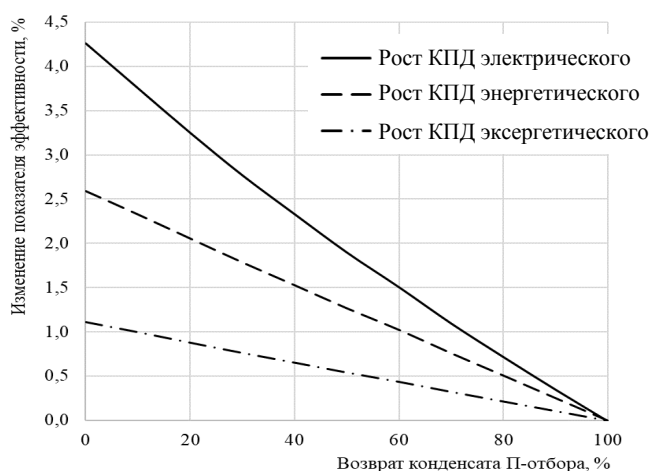


Рис. 4. Изменение показателей эффективности при снижении электрической мощности станции и сохранении минимального пропуска отработавшего пара в конденсатор

Fig. 4. Changes in performance indicators with a decrease in the electric power of the plant and maintaining a minimum flow of exhaust steam into the condenser

Из анализа данных рис. 4 следует, что наибольший рост эффективности имеет место для ТЭЦ с большим невозвратом конденсата производственного отбора в цикл с максимальным КПД при полном невозврате. Для варианта со снижением электрической мощности турбоустановки при сохранении минимального пропуска пара в конденсатор рост электрического КПД составляет 4,3 %, рост энергетического и эксергетического КПД соответственно 2,6 и 1,1 %. При этом наблюдается наибольшее снижение температуры дымовых газов в тракте парового котла – до 105 °С, а на входе в дымовую трубу, после смешения с дымовыми газами от АБТН, – 110 °С. Предельная мощность АБТН (при полном невозврате конденсата) для данной модернизации составляет 8,2 МВт.

ВЫВОДЫ

1. Отбор части дымовых газов из тракта парового котлоагрегата для привода АБТН, утилизирующего теплоту охлаждения циркуляционной воды ТЭЦ для нагрева потока подпиточной воды на ТЭЦ со значительными невозвратами конденсата производственного отбора в цикл, позволяет по-

лучить существенный рост показателей эффективности ТЭЦ, значительно превышающий вариант с паровым приводом АБТН.

2. Регенеративное использование низкотемпературных сбросных тепловых потоков позволяет развить систему регенеративного подогрева питательной воды и повысить эффективность использования топлива за счет применения АБТН с приводом дымовыми газами. При этом в результате модернизации возможно изменять функции цели:

- сохранение расхода свежего пара в голову турбины с увеличением электрической мощности турбоустановки. Увеличение электрической мощности в пределе составляет 3,06 МВт, увеличение электрического КПД на 4,4 %, энергетического и эксергетического КПД – соответственно на 2,0 и 1,3 %. Температура уходящих дымовых газов в пределе снижается до ≈ 113 °С;

- сохранение электрической мощности. Увеличение электрического, энергетического и эксергетического КПД составляют 4,2, 2,4 и 1,2 % соответственно. Снижение расхода свежего пара в голову турбины 6,68 т/ч. Температура уходящих дымовых газов при максимальной мощности АБТН составляет ≈ 111 °С;

- снижение электрической мощности с сохранением минимального пропуска пара в конденсатор. Снижение электрической мощности в пределе составляет 0,91 МВт, уменьшение расхода свежего пара на турбину 8,85 т/ч, рост электрического, энергетического и эксергетического КПД соответственно составляет 4,3, 2,6 и 1,1 %. Предельная температура уходящих дымовых газов на входе в дымовую трубу составляет ≈ 110 °С.

Для последних двух вариантов также характерно снижение расхода топлива на котел, что связано со снижением производства пара.

3. Возможно достижение более значительного эффекта при вовлечении в процесс регенеративного использования низкотемпературных потоков ТЭЦ других технологических потоков тепловой схемы.

4. Оценка целесообразности внедрения данного мероприятия требует также проведения экономических расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Energy efficiency and sustainable development goals (SDGs) / A. Zakari, I. Khan, D. Tan [et al.] // *Energy*. 2022. Vol. 239, Part E. Art. 122365. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122365>.
2. Пути повышения эффективности использования первичного топлива в Республике Беларусь: [энергосбережение в Республике Беларусь] / В. Н. Романюк Д. Б. Муслина, А. А. Бобич [и др.] // *Энергетическая стратегия*. 2013. № 3. С. 39–43.
3. Япаров, И. В. Повышение технико-экономических показателей газотурбинных и парогазовых ТЭС путем эффективного использования низкопотенциальных источников энергии / И. В. Япаров, М. М. Замалеев // *Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: Седьмая Междунар. науч.-техн. конф., Ульяновск, 21–22 апр. 2017 г.* Ульяновск: Ульяновск. гос. техн. ун-т, 2017. Т. 1. С. 281–285.
4. Янчук, В. В. Повышение эффективности действующих тепловых электрических станций в современных условиях / В. В. Янчук, В. Н. Романюк // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 6. С. 511–523. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-511-523>
5. Ritchie, H. Electricity Mix / H. Ritchie, P. Rosado // *Our world in data*. URL: <https://ourworldindata.org/electricity-mix>. Date publ.: July 2020.

6. Янчук, В. В. Модернизация системы регенеративного подогрева питательной воды в цикле турбоустановки ПТ-60 / В. В. Янчук, В. Н. Романюк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 6. С. 509–529. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-509-529>
7. Heat Pump // Thermax. URL: <https://www.thermaxglobal.com/heat-pumps/> (date of access: 30.10.2024).
8. DEEPBLUE: [website]. URL: <https://www.deepbluechiller.com/> (date of access: 30.10.2024).
9. Романюк, В. Н. Абсорбционные или парокомпрессионные тепловые насосы в схемах ТЭЦ / В. Н. Романюк, А. А. Бобич, С. В. Мальков // Энергия и Менеджмент. 2013. № 4. С. 18–21.
10. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. М.: Энергия, 1973. 296 с.

Поступила 03.03.2025 Подписана в печать 06.05.2025 Опубликовано онлайн 31.07.2025

REFERENCES

1. Zakari A., Khan I., Tan D., Alvaro R., Dagar V. (2022) Energy Efficiency and Sustainable Development Goals (SDGs); Energy Efficiency and Sustainable Development Goals (SDGs). *Energy*, 239 (Part E), 122365. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122365>.
2. Romanyuk V. N., Muslina D. B., Bobich A. A., Kolomytskaya N. A., Bubyri' T. V. (2013) Ways to Increase the Efficiency of Primary Fuel Use in the Republic of Belarus. *Energeticheskaya strategiya* [Energy Strategy], (3), 39–43 (in Russian).
3. Yaparov I. V., Zamaleev M. M. (2017) Improving the Technical and Economic Performance of Gas Turbine and Combined-Cycle Thermal Power Plants Through the Efficient Use of Low-potential Energy Sources. *Energoberezhenie v gorodskom khozyaistve, energetike, promyshlennosti : Sed'maya mezh-dunar. nauch.-tekhn. konf., Ulyanovsk, 21–22 apr. 2017 g.* [Energy Saving in Urban Economy, Energy, Industry: Proceedings of the 7th International Scientific and Technical Conference]. Ulyanovsk, 281–285 (in Russian).
4. Yanchuk V. V., Romaniuk V. N. (2022) Operating Thermal Power Plants Efficiency Improvement under Current Conditions. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (6), 511–523. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-511-523> (in Russian).
5. Ritchie H., Rosado P. (July 2020) Electricity Mix. *Our world in data*. Available at: <https://ourworldindata.org/electricity-mix>.
6. Yanchuk V. V., Romaniuk V. N. (2023) Modernization of the Feed Water Regenerative Heating System in the “PT-60” Steam Turbine Unit Cycle. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (6), 509–523. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-509-529> (in Russian).
7. Heat Pump. *Thermax*. Available at: <https://www.thermaxglobal.com/heat-pumps/> (accessed 30 October 2024).
8. *DEEPBLUE*. Available at: <https://www.deepbluechiller.com/> (accessed 30 October 2024).
9. Romanyuk V. N., Babich A. A., Mal'kov S. V. (2013) Absorption or Steam Compression Heat Pumps in Thermal Power Plant Circuits. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (4), 18–21 (in Russian).
10. Brodyanskii V. M. (1973) *Exergetic Method of Thermodynamic Analysis*. Moscow: Energiya Publ. 296 (in Russian).

Received: 03 March 2025

Accepted: 06 May 2025

Published online: 31 July 2025

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-353-366>

УДК 544.723.21

Development and Investigation of Hydrogen Sulfide Adsorbents From Natural Materials

A. A. Filimonova¹, A. Yu. Vlasova¹, N. D. Chichirova¹, R. F. Kamaliev¹,
N. B. Karnitsky²

¹Kazan State Power Engineering University (Kazan, Russian Federation),

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

Abstract. Adsorption materials based on natural minerals are considered in the world literature as inexpensive hydrogen sulfide adsorbents capable of completely replacing commercial products such as synthetic zeolites. The global demand for inexpensive, accessible, safe materials is growing, including in the field of cleaning industrial and agricultural gas emissions from hydrogen sulfide. The article presents an analysis of literary data on natural clays, activated sludge and other materials and methods of their use for hydrogen sulfide adsorption. Data on the composition of activated sludge, clays and limestone rocks are provided. The composition studies were carried out on an infrared spectrophotometer. The inorganic component of activated sludge includes iron oxide, aluminum, calcium, magnesium compounds, and silicates. Limestone consists of carbonates, iron oxide, silicates, and when calcined at high temperatures, it mainly forms calcium oxide. Various clays contain aluminosilicates, iron oxides, copper, cobalt, and manganese. Due to the content of metal oxides, natural materials have a chemisorption mechanism, and due to the content of aluminum and silicon compounds, they have a physical sorption mechanism. 17 compositions of composite materials from natural minerals were developed and their sulfur content was studied. A study was also conducted on the absorption capacity of activated sludge in a liquid state. It was shown that all natural materials have a high potential for use as adsorbents with minimal preparation (dehydration, calcination). Compositions that do not contain expensive additives, consisting mainly of calcined limestone rock and clays, showed sulfur capacity from 10 to 40 %.

Key words: hydrogen sulfide, adsorbents, clay, bentonite, limestone, gas purification

For citation: Filimonova A. A., Vlasova A. Yu., Chichirova N. D., Kamaliev R. F., Karnitsky N. B. (2025) Development and Investigation of Hydrogen Sulfide Adsorbents From Natural Materials. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (4), 353–366. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-353-366>

Разработка и исследование адсорбентов сероводорода из природных материалов

A. A. Филимонова¹, А. Ю. Власова¹, Н. Д. Чичирова¹, Р. Ф. Камалиева¹,
Н. Б. Карницкий²

¹Казанский государственный энергетический университет (Казань, Российская Федерация),

²Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Адсорбционные материалы на основе природных минералов рассматриваются в мировой литературе как недорогие адсорбенты сероводорода, способные полностью заменить

Адрес для переписки

Власова Алена Юрьевна
Казанский государственный
энергетический университет
ул. Красносельская, 51,
420066, г. Казань, Российская Федерация
Тел.: +7 843 519-42-52
vlasovaay@mail.ru

Address for correspondence

Vlasova Alena Yu.
Kazan State Power
Engineering University
51, Krasnoselskaya str.,
420066, Kazan, Russian Federation
Tel.: +7 843 519-42-52
vlasovaay@mail.ru

коммерческие продукты, такие как синтетические цеолиты. Мировой спрос на недорогие, доступные, безопасные материалы растет, в том числе в сфере очистки промышленных и сельскохозяйственных газовых выбросов от сероводорода. В статье представлен анализ литературных данных о природных глинах, активном иле и других материалах и способах их использования для адсорбции сероводорода. Приведены данные о составах активного ила, глин и известняковых пород, исследования которых проведены на инфракрасном спектрофотометре. Неорганическая составляющая активного ила включает в себя оксид железа, соединения алюминия, кальция, магния, силикаты. Горная известковая порода состоит из карбонатов, оксида железа, силикатов, при прокаливании при высоких температурах образует преимущественно оксид кальция. Различные глины содержат алюмосиликаты, оксиды железа, меди, кобальта, марганца. За счет содержания оксидов металлов природные материалы имеют механизм хемосорбции, а за счет содержания соединений алюминия и кремния обладают физическим механизмом сорбции. Разработаны 17 составов композиционных материалов из природных минералов и изучено их содержание серы. Также было проведено исследование поглощающей способности активного ила в жидком состоянии. Показано, что все природные материалы обладают высоким потенциалом для использования в качестве адсорбентов при минимальной подготовке (обезвоживании, прокаливании). Композиции, не содержащие дорогостоящих добавок, состоящие в основном из обожженной известняковой породы и глин, показали сероемкость от 10 до 40 %.

Ключевые слова: сероводород, адсорбенты, глина, бентонит, известняк, очистка газа

Для цитирования: Разработка и исследование адсорбентов сероводорода из природных материалов / А. А. Филимонова [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 4. С. 353–366. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-353-366>

Introduction

The search for the method of removing hydrogen sulfide from gas flows was an urgent problem for several decades [1–2]. This is due to the constant growth of world demand for energy from fossil types of fuel, biofuel, biogas, natural gas and other types of hydrocarbon fuel, which acquires more and more importance in the production of electricity. Cleaning gaseous fuel from hydrogen sulfide is important due to the following reasons: 1) H_2S changes the pH of the atmosphere and participates in the formation of acid rains; 2) hydrogen sulfide is the cause for the appearance of a pungent odor, which affects mainly the urban population near the wastewater treatment plants; 3) H_2S is a toxic gas, it is included in the list of toxic industrial compounds, therefore it is necessary to ensure protection and compliance with safety precautions when working with this gas; 4) there is an increased corrosion activity in relation to equipment, especially in natural gas pipelines or steam boilers; 5) hydrogen sulfide deactivates catalysts that are used to convert fuel or for various energy processes, for example, in fuel elements.

The separation of hydrogen sulfide from air flows using adsorption is considered as one of the most effective and economical methods. Ensuring environmental stability directed the attention of researchers to the use of natural materials as a source of effective H_2S adsorbents. These materials, subjected to pyrolysis, with additional activation of or without it, were investigated by various authors [3–6]. Good indicators of natural materials during desulfurization were associated not only with superficial alkalinity due to

the high content of calcium and magnesium, but also with other components of the inorganic phase of sediment, such as iron or copper compounds that could contribute to oxidation reactions.

A possible alternative to commercial technologies for removing carbon dioxide and other pollutants from biogas is the use of inexpensive natural materials, such as clay, zeolite, fly ash and wood ash. These materials are already used for commercial purposes to purify water, natural gas and in adsorption processes [3] their main advantages include the low cost, availability and simplicity of separation processes. The main restriction of the use of inexpensive natural materials for the purification of biogas is low absorbing ability. However, this process can be improved by activating materials using physical and chemical methods to increase their adsorption ability.

This article considers the use of inexpensive natural and modified materials to remove pollutants from biogas. The purpose of the work is to develop and study the possibility of using various natural materials for the purification of biogas, natural gas and other types of hydrocarbon fuel from hydrogen sulfide. In addition, this study conducted a review of literary data, the advantages and disadvantages of various inexpensive materials used to clean and improve the quality of gaseous fuel containing hydrogen sulfide are considered.

Literature review

Inexpensive materials for the purification of gaseous fuel from hydrogen sulfide include easily accessible and effective natural materials. It is possible to produce adsorbents from local and natural materials that are effective for purifying biogas. Such materials include ash -rich soils, biological activated sludge, coal, clay, rocks, etc. Their use reduces costs as compared to other materials. These materials demonstrated high efficiency, reaching the following indicators: clay (90 %); New Zealand brown soil rich in iron (93.8 %); industrial steel cotton wool (95 %) and compost (80 %) [4]. This study proposes new ways to increase the efficiency of natural materials due to thermal preliminary processing of biomass ash to reduce moisture content, modify the surface of activated coal to improve the absorption of acidic gases, integrate adsorbents to create synergy, regeneration and re -use of adsorbents to increase the environmentalness of the process. The use of natural materials has great prospects in achieving the goals of sustainable development of the United Nations, especially in developing countries.

The economy of the closed cycle concept of implies the use of waste as a secondary raw material as part of a program for renewable and stable energy sources. At wastewater treatment plants, one of the most important waste is activated sludge, and in recent years its disposal has been widely discussed. In [7], wastewater sediment from treatment facilities was used as raw materials for the production of activated coal by the method of physical and chemical activation. The resulting activated carbon was subsequently tested for the removal of hydrogen sulfide in order to further use for deodorization at the wastewater treatment

station. The effect of activation temperature and the chemical reagent (NaOH and KOH) in the process of activation were studied. On the one hand, the characteristics of each obtained coal sample were analyzed in terms of surface area according to the BET method (Brunauer–Emmet–Tylor), pore and micropore volume, pore diameter, surface morphology and ground-pot. On the other hand, BET isotherms were also calculated. Finally, both the obtained activated carbon and commercial samples were tested for H₂S removal from the gas flow. The results showed that the optimum temperature of physical and chemical activation is 600 °C and 1000 °C, respectively, and the best of the tested activating substances is KOH. The coal prepared activated carbon showed excellent properties (specific surface area of about 300 m²/g) for removing H₂S, even higher efficiency than the tested commercial samples of activated coal.

A similar study was presented in [8]. The work analyzed the temperature effect of the activated sludge pyrolysis to obtain coal and the concentration of potassium hydroxide on the desulfurization process. The efficiency of hydrogen sulfide adsorption with activated potassium alkali coal, obtained from activated sludge, was optimal and amounted to 94 %.

Diffusion through active activated sludge as a bio-cleaning system to eliminate odors has been used for more than 30 years, but has limited use due to disagreements in the literature regarding the effect on the efficiency of wastewater treatment [9–12]. Researchers are actively engaged in the use of activated sludge as an adsorbent pollutant [13].

In [14], the authors proposed using activated sludge to clean air from hydrogen sulfide at state treatment facilities. The experiments were carried out on a laboratory installation and it was shown that H₂S in concentrations that usually release during wastewater purification (less than 50 ppm) can be effectively cleaned by diffusion through activated sludge without prejudice to the productivity of the purification process with activated sludge.

In the work [14] it was shown that the use of diffusion through activated sludge as a two-stage wastewater treatment system and elimination odors is an alternative to traditional processes of sulfuric outing gases purification, such as biofilters, bioskrubbers and biosettling tanks, both from a practical point of view (use of existing structures) and from economic (minimal capital costs).

Natural adsorbents gaining popularity in recent years are clay adsorbents, which are relatively new. This class of materials is studied for their adsorption ability due to their prevalence, low cost, stability and environmentally friendly characteristics. Clay minerals, widespread in nature, have unique physical and chemical properties that make them indispensable in many areas, especially for the industrial removal of pollutants from smoke gases. Clay minerals have a unique layered structure, cation-exchange ability, high specific surface area and thermal stability, and are also inexpensive, which makes them promising as adsorbents and carriers of catalysts [15]. The common natural clay minerals mainly include kaolinitis, montmorillonite, bentonite, vermiculite, Illit, sepiolite,

saponite, etc. In the review [16], the types and structures of common clay minerals and their methods are presented modifications. It describes the latest achievements in the use of modified clay materials to remove pollutants from flue gases, with an accent to the adsorption ability and mechanism of adsorption of sulfur and volatile organic compounds.

Often used clay adsorbents are kaolinitis, bentonite and palygorskite. Several studies were conducted to compare various types of clay minerals as adsorbents. One of them is the study [16], which used kaolinitis, montmorillonite, palygorskite and vermiculite to remove sulfur compounds from the gas phase. This revealed the differences between clay minerals, despite the fact that vermiculite has a slightly larger surface area, kaolinitis showed better performance compared to other adsorbents due to differences in the mineralogical composition. This emphasizes the effect of differences in the types of adsorbents of clay on their productivity and interaction with sulfur compounds.

Most importantly, clay minerals can be modified to regulate their adsorption ability, and the developed material can be regenerated and used again. Clay minerals can be used as adsorbents of various compounds from the gas phase. However, this topic has not yet been fully studied. There are reports about the use of minerals such as kaolinitis, galluli, montmorillitis, bentonite, saponite, vermiculite, illit, sepiolite and palygorskit, for cleaning of a wide range of pollutants, including CO₂, CH₄, SO₂, H₂S, NH₃ and flying organic compounds, such as butylaldehyde, oil acid, dimethyldisulfide, n-gexan, benzene, methanol [17]. The latest classification of the studied clay adsorbents is adsorbents based on a metallorganic frame (MOF). They attracted the researchers' attention because of their characteristics, such as a large volume of pores, a designed crystalline structure and an adjustable size of pores. By changing the metal and the organic connecting agent MOF, the size of the pores can be changed [18]. With such strong opportunities, the use of MOF also has disadvantages. It is necessary to establish selectivity according to sulfur so that it becomes a viable adsorbent for desulfurization. MOF also has poor thermal and mechanical stability.

The search of effective adsorbent for desulfurization is constantly ongoing. Since the adsorbents of clay are stable, inexpensive and demonstrate great potential for sulfur adsorption, studies using these materials do not stop. The study [19] shows good bentonite performance for adsorption of more voluminous heterocyclic compounds of sulfur. This offers the idea of using bentonite as an additional process for removing sulfur compounds, which were not completely removed, for example, in the amino cleaning process.

Thus, the removal of H₂S is of primary importance to prevent negative consequences, such as the impact on people and the environment as a whole. It has been shown that natural materials are effective, promising and relatively new candidate material in the H₂S adsorbents. Nevertheless, despite the fact that some technologies are used on an industrial scale, they are far from being perfect. Thus, there is a great potential for their improvement and optimization in order to further reduce costs and increase the characteristics of the separation of gaseous fuels.

Materials and methods

Equipment used in the work:

To analyze the composition of the solid phase of natural materials, IR spectrophotometric analysis was performed on a Shimadzu IRAffinity-1S spectrophotometer.

To determine the adsorption capacity of the studied adsorbents, spectrophotometric detection of sulfides in an absorbing solution of cadmium acetate was used on a Shimadzu UV-1800 UV spectrophotometer at a wavelength of $\lambda = 670$ nm.

Testing of the developed adsorbents from natural materials in laboratory conditions was carried out on a laboratory setup, including a gas source, an adsorbent tube filled with an adsorbent, and a receiver with an absorbent solution.

The following natural materials were used as adsorbents in this work: activated sludge, clays (red, kaolin, bentonite, "Ural" yellow, "Ural" blue, "Uzbek" pink, "Astana" white, "Aktobe" white), limestone rock of the Volga River (Table 1).

Table 1

Appearance of the natural materials used

Name of natural material	Appearance	Name of natural material	Appearance
Natural limestone rock		Clay "Uzbek" blue	
Calcined limestone rock		Clay "Ural" yellow	
Red clay		Clay "Uzbek" pink	
Clay "Aktobe" white		Clay "Astana" white	

Composition and analysis of activated sludge:

Experimental laboratory studies were conducted using excess activated sludge, the species composition of which is represented by biological micro-

organisms. The structure of activated sludge is a flocculent mass of brown color, which is a heterogeneous system related to fine suspensions. The main organic components are proteins, fats and carbohydrates, which make up 75–85 % of the ash-free (organic) matter. The remaining 15–20 % is accounted for by the lignin-humus complex.

The inorganic component of activated sludge includes hydroxides, phosphates, carbonates, silicates and other compounds.

Some components of the inorganic composition of activated sludge are:

- Quartz (SiO_2).
- Iron compounds in the form of magnetite (Fe_2O_3).
- Aluminum and silicon compounds in the form of muscovite $((\text{K}, \text{Na})\text{Al}_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2)$ and illite $(\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2)$.
- Calcium and magnesium compounds in the form of phosphates $(\text{Ca}_9\text{Fe}(\text{PO}_4)_7, \text{Ca}_{18}\text{Mg}_2\text{H}_2(\text{PO}_4)_{14}, \text{Ca}_9\text{FeH}_{0.9}(\text{PO}_4)_7)$.

The inorganic component of the sludge also includes heavy metal colloids in the form of hydroxides, which arrived in this form from the primary settling tanks [20].

After filtering the liquid portion and drying for two hours at a temperature of 100 °C, the inorganic phase of the activated sludge was analyzed using an IR spectrophotometer (Fig. 1).

Table 2 shows the decoding of IR spectra based on the characteristic absorption bands of certain bonds or groups of atoms.

According to the results of IR spectrophotometry, the inorganic composition of activated sludge is represented mainly by humic substances, namely, fulvic acids. The following intense absorption bands were found in the IR spectra: 3500–3400 cm^{-1} , relate to OH groups (phenolic, alcohol and OH groups in carboxyl groups); 2923 cm^{-1} – indicates the presence of long methylene chains; 2852 cm^{-1} – relates to methyl end groups. The absorption band at a wavelength of 1714 cm^{-1} corresponds to carboxyl groups ($\text{C}=\text{O}$ in carboxyl groups), 1651 cm^{-1} – $\text{C}=\text{N}$ in imino groups. 1452 cm^{-1} corresponds to methyl and methylene groups, 1204 cm^{-1} – OH groups in carboxyl groups, 1105 cm^{-1} – OH groups of carbohydrates. The IR spectra of fulvic acids also contain absorption bands with an intensity of 2928 and 1500 cm^{-1} , which correspond to CH_2 -, CH_3 -groups and $\text{C}=\text{C}$ (arom). Strong absorption in the region of 1100 cm^{-1} is associated with deformation vibrations of OH-alcohol groups. Such a spectrum is characteristic of fulvic acids, which contain less nitrogen and carbon, and more oxygen and hydrogen, compared to humic acids.

Composition and analysis of the Volga River limestone rock:

Limestone rock is a crumbly inorganic material, white with yellow and light brown inclusions. Since most of the limestone rock is calcium carbonate, when heated (over 840 °C), it decomposes with the release of carbon dioxide and calcium oxide (quicklime). Fig. 2 and 3 show the spectra of limestone rock before and after pyrolysis.

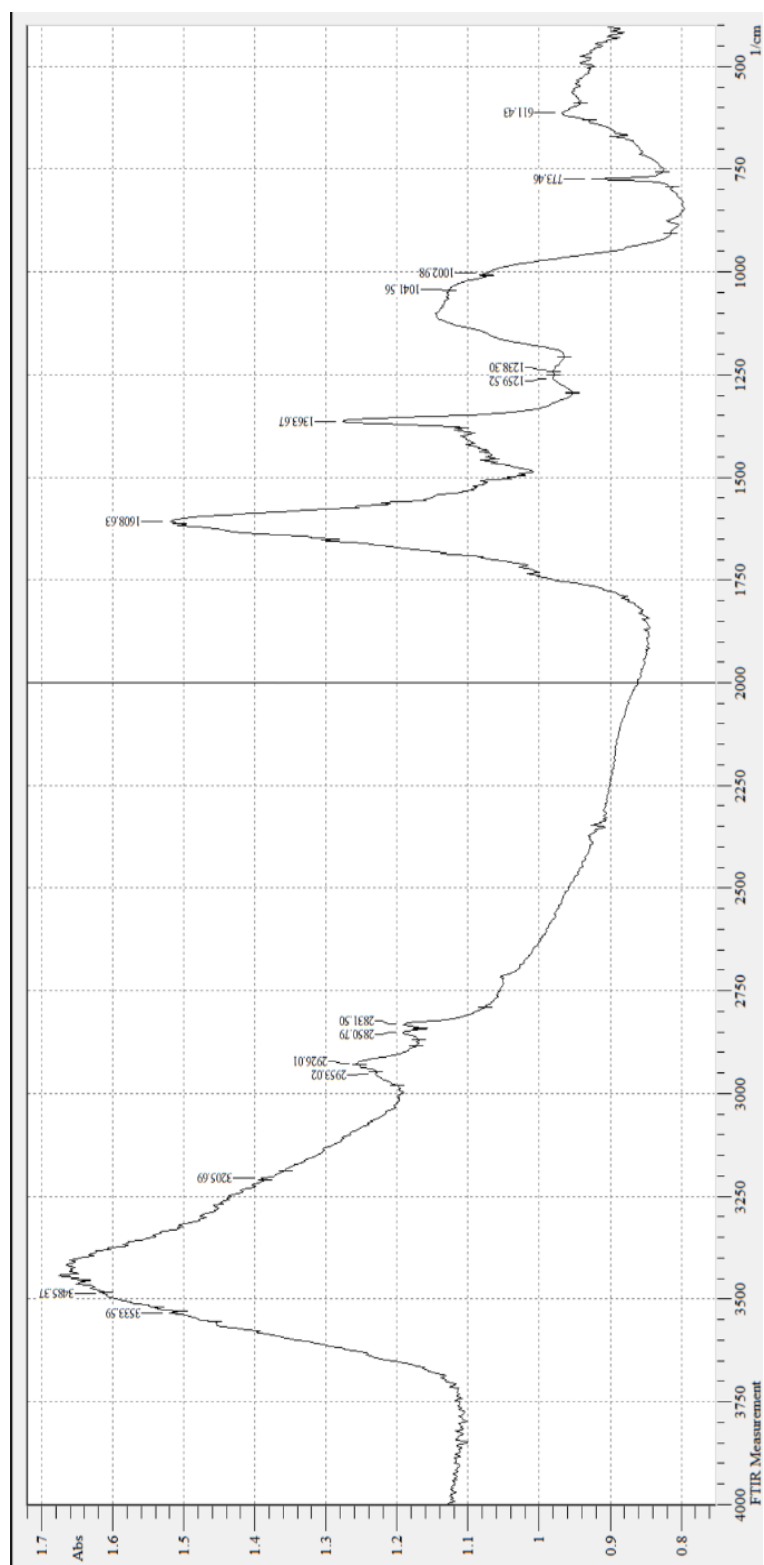


Fig. 1. IR spectrum of activated sludge

Table 2

Table of characteristic frequencies for the IR spectrum of activated sludge

Absorption range, cm ⁻¹	Activated sludge
3500	valence O-H groups
2950	valence bonds of alkanes
2815	valence C-H groups
2700	valence O-H bonds of carboxylic acids
2325	CO ₂ from the atmosphere and aliphatic groups of carboxylic acids
1750	C=O bonds
1651	C=N bonds in imino groups
1600	valence conjugated and benzene bonds
1500	small amount of aromatic compounds
1355	valence C-H groups
1250	carboxylic acid groups COOH and C-C bonds
1100	sulfates, alcohols, ethers
1040	characteristic peaks for humic substances
1000	silicates
870	carbonates
750	silicates
620	sulfates
611	characteristic peaks for humic substances
500	iron oxide, silicates

Table 3 shows the decoding of IR spectra based on the characteristic absorption bands of certain bonds or groups of atoms.

The results of IR spectroscopy showed that limestone rock has good potential for capturing hydrogen sulfide, especially after preliminary heat treatment, due to the content of predominantly alkaline earth metal oxides in its composition.

Composition and analysis of clay materials:

Table 4 presents compositions of the inorganic part of various types of clays.

The chemical composition of clay materials can simultaneously provide strength of adsorbents due to the high content of silicon and aluminum oxide, porosity due to the finely dispersed composition, and chemisorption due to compounds of iron, copper, cobalt, chromium, cadmium, and manganese.

Preparation of composite adsorbents from natural materials:

Natural materials (activated sludge, clays, limestone rock) after preliminary preparation were mixed in certain proportions with sodium alkali, water, zinc oxide, iron, copper, manganese, extrudates were obtained with an average granule surface area of 50 mm², dried for 1 hour at a temperature of 100 °C. Preliminary preparation of activated sludge consisted of filtering the liquid part and drying for two hours at a temperature of 100 °C. Preliminary preparation of limestone rock consisted of pyrolysis at 1000 C° for 2 hours. Clays were not pre-treated in any way.

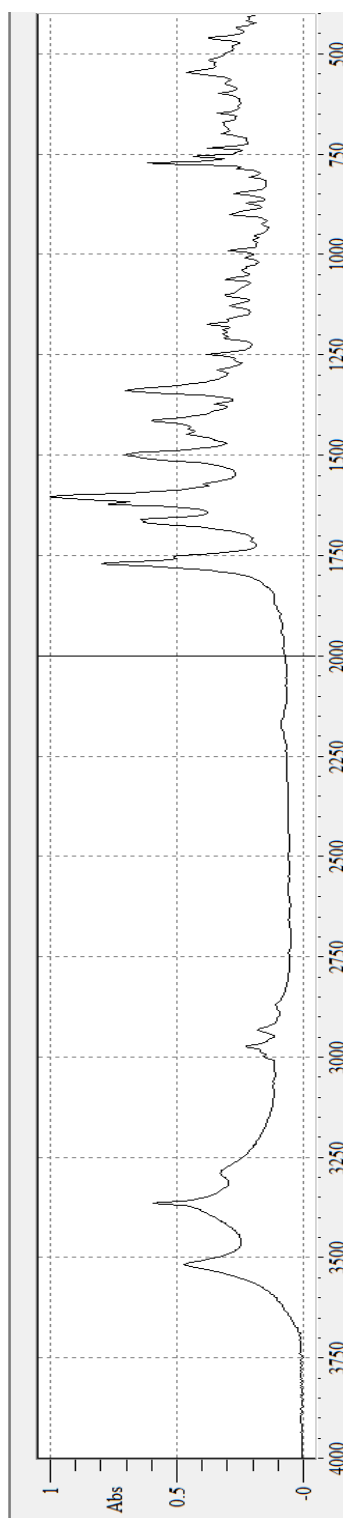


Fig. 2. IR spectrum of limestone rock

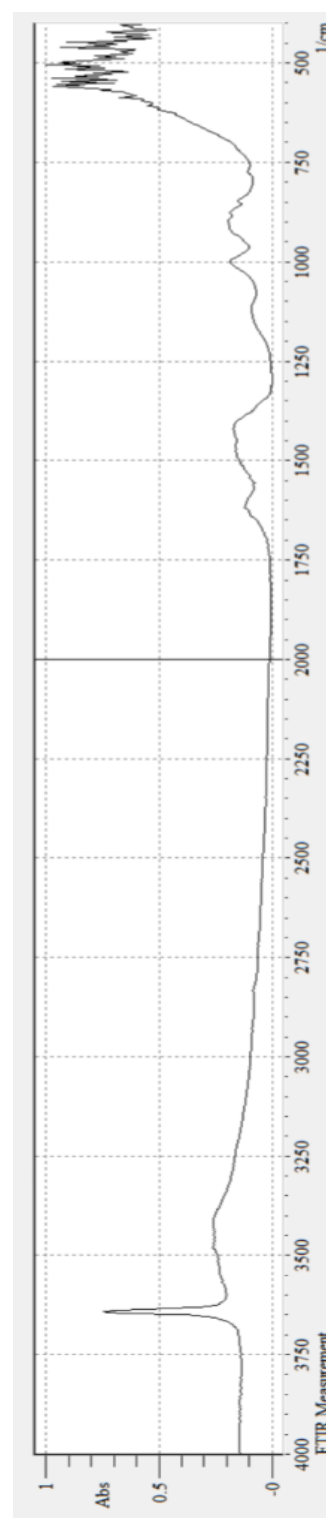


Fig. 3. IR spectrum of limestone rock after pyrolysis at 1000 °C for 2 hours

Table 3

Table of characteristic frequencies for IR spectra of limestone rock

Absorption range, cm^{-1}	Natural	After pyrolysis
3640	valence OH bonds $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – the main component	valence OH bonds $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – the main component
3500–3400	valence OH groups	valence OH groups with hydrogen bonds
3360	valence CH bonds	valence CH bonds
3350	stretching vibrations of the NH group – organic residues – amino acids, proteins in large quantities	–
3250	iron oxide	iron oxide
3210	valence $\text{C}=\text{N}-\text{H}$ bonds	valence $\text{C}=\text{N}-\text{H}$ bonds
2950	valence bonds of alkanes	–
2850	valence C-H groups	–
2833–2750	CHO-aldehydes, OCH_3 -esters, aromatic compounds in large quantities	stretching vibrations of the aldehyde group CHO
2325	CO_2 from the atmosphere and aliphatic groups of carboxylic acids	–
1700	$\text{C}=\text{O}$ bonds – unsaturated and aromatic aldehydes and ketones in large quantities	–
1600	inorganic calcium, gypsum, quartz, clay, dolomite	unburned carbon-like organic compounds and bound water
1450	condensed aromatic benzene rings	
1414	calcium carbonate	calcium oxide
1280	ethers	–
1100	sulfates	sulfates and brown soil
1000	silicates	silicates
997.2	deformation vibrations of $\text{CH}=\text{CH}_2$ bonds – unsaturated hydrocarbons	–
950	clays	clays
870	carbonates	carbonates
848	aromatic compounds	–
750–774	silicates	silicates
620	sulfates	sulfates, brown soil, clays, silicates
500	iron oxide, silicates	iron oxide, silicates

Table 4

Characteristic chemical components in the composition of clays

Name	Chemical composition providing the main properties
Bentonite	Montmorillonite $\text{Al}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Kaolin	Kaolinite $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Red clay	Fe_2O_3 , MnO
Blue clay	Co^{2+} , Cd^{2+}
Pink clay	Al_2O_3
Yellow clay	CuO , Fe_2O_3
White clay	CaCO_3

The calculation of sulfur capacity was carried out using the formula

$$A, \% = \left[\frac{\left(\frac{(C_0 - C) \cdot n}{m} \right)}{1000} \right] \cdot 100 \%,$$

where C_0 – initial concentration, mg; C – residual concentration, mg; n – the proportion of adsorbate that enters the collecting solution; m – adsorbent mass, g.

Results

The composition and characteristics of the obtained adsorbents from natural materials are presented in Table 5. The compositions are arranged in order of increasing sulfur capacity.

Table 5

**Component composition of the developed adsorption materials
and measured sulfur capacity**

N	Composition of the adsorbent	Sulfur capacity, %
1	10 % bentonite, 74.7 % ZnO, 15.3 % NaOH	0
3	10 % natural rock, 15.3 % NaOH, 74.7 % ZnO	0
4	10 % kaolin, 74.7 % ZnO, 15.3 % NaOH	0
5	50 % bentonite, 8.5 % NaOH, 41.5 % Fe ₂ O ₃	0
6	50 % kaolin, 8.5 % NaOH, 41.5 % Fe ₂ O ₃	0.9
7	50 % calcined rock, 8.5 % NaOH, 41.5 % Uzbek clay (pink)	1.8
8	50 % calcined rock, 8.5 % NaOH, 41.5 % Ural clay (yellow)	1.9
9	50 % calcined rock, 8.5 % NaOH, 41.5 % Astana clay (white)	2.7
10	50 % calcined rock, 8.5 % NaOH, 41.5 % Uzbek clay (blue)	4.2
11	50 % calcined rock, 8.5 % NaOH, 41.5 % dried activated sludge	7.6
12	50 % calcined rock, 8.5 % NaOH, 41.5 % red clay	11.74
13	50 % calcined rock, 8.5 % NaOH, 41.5 % Aktobe clay (white)	18.6
14	50 % dried activated sludge, 8.5 % NaOH, 41.5 % Fe ₂ O ₃	25
15	50 % calcined rock, 8.5 % NaOH, 41.5 % ZnO	34.4
16	50 % calcined rock, 8.5 % NaOH, 41.5 % Fe ₂ O ₃	38.9
17	40 % calcined rock, 10 % NaOH, 10 % ZnO, 10 % Fe ₂ O ₃ , 10 % CuO, 10 % CaO, 10 % MnO	48.2

The obtained results of sulfur capacity of the developed compositions from natural materials are consistent with the literature data. The sulfur capacity of the obtained adsorbents consists of a set of physical and chemical characteristics. Thus, natural materials (clay, sand, uncalcined rock, iron oxide, zinc oxide) have predominantly a large specific surface due to microporosity. At the same time, calcined sludge, sodium alkali, zinc oxide, iron oxide, manganese, calcium exhibit the ability to chemisorption. Thus, a combined adsorption mechanism is used in the developed materials.

Experiments were conducted with activated sludge to determine its catching capacity in liquid form as an absorbent. Hydrogen sulfide was passed through a suspension with activated sludge, including with the expectation of the biological activity of activated sludge. However, with this method of using this waste, significant results in desulfurization could not be obtained.

In turn, activated sludge, dried after filtration at 100 °C, in the combination of composite materials can show high results in sulfur capacity in comparison with other materials based on minerals.

Under other similar conditions, the best results in terms of sulfur capacity were shown by compositions with red clay and white Aktobe clay.

CONCLUSION

The article presents a literature analysis of adsorbents made from natural materials, and the following materials are selected for use: limestone rock, clays (red, bentonite, kaolin, Uralskaya yellow, Uralskaya blue, Uzbekskaia pink, Astana white, Aktobe white), and activated sludge. Natural materials were preliminarily dehydrated, dried, and calcined and mixed in certain proportions with chemical reagents (sodium hydroxide) for chemical activation. Alkaline earth metal oxides (calcium, zinc, iron) and transition metal oxides (manganese, copper) were added to the composite material to increase its chemisorption capacity.

Seventeen adsorption compositions based on natural materials were proposed, of which seven demonstrated medium and high sorption capacity for hydrogen sulfide. The best properties in terms of sulfur capacity were demonstrated by a composition including 40% calcined rock, 10% NaOH, 10% ZnO, 10 % iron (III) oxide, 10 % CuO, 10 % CaO, 10 % MnO.

All developed adsorption composite materials based on natural minerals have satisfactory physical and chemical characteristics, which together contribute to achieving a high level of absorption capacity in relation to hydrogen sulfide.

This work was supported by a grant provided by the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan for conducting fundamental and applied scientific research in scientific and educational institutions, enterprises, and organizations of the real sector of the economy of the Republic of Tatarstan (No 15/2024-FIP of 24.12.2024. "Block for the preparation of gas emissions from petrochemical enterprises for energy use").

REFERENCES

1. Alguacil F. J. (2023) Recent Advances in H₂S Removal from Gas Streams. *Applied Sciences*, 13 (5), 3217. <https://doi.org/10.3390/app13053217>.
2. Kasulla S. Malik S. J., Zafar S., Saraf A. (2021) A Retrospection of Hydrogen Sulphide Removal Technologies in Biogas Purification. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, 5 (3), 857–863.
3. Mulu E., M'Arimi M. M., Ramkat R. C. (2021) A Review of Recent Developments in Application of Low Cost Natural Materials in Purification and Upgrade of Biogas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111081. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111081>.
4. Jepleting A., Mecha A. C., Sombei D., Moraa D., Chollom M. N. (2025) Potential of Low-cost Materials for Biogas Purification, a Review of Recent Developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 210, 115152. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115152>.

5. Mrosso R., Mecha A. C., Kiplagat J. (2024) Natural and Low-cost Sorbents as Part of the Solution for Biogas Upgrading: A Review. *Adsorption*, 30, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10450-024-00464-9>.
6. Iliev I., Filimonova A., Chichirov A., Vlasova A., Kamaliev R., Beloev I. (2025) Natural and Waste Materials for Desulfurization of Gaseous Fuels and Petroleum Products. *Fuels*, 6 (1), 13. <https://doi.org/10.3390/fuels6010013>.
7. Luján-Facundo M. J., Iborra-Clar M. I., Mendoza-Roca J., Alcaina-Miranda M. I., Maciá A. M., Lardín C., Pastor L., Claros (2020) Preparation of Sewage Sludge-Based Activated Carbon for Hydrogen Sulphide Removal. *Water, Air and Soil Pollution*, 231 (4), 187. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04518-w>.
8. Calderon S. T., Pampa-Quispe N. B., Huaranga M. A. C. (2022) Adsorption of Hydrogen Sulfide by Activated Carbon Produced by Regeneration of Sludge from Upflow Anaerobic Sludge Blanket. *Engineering for Rural Development*, 5, 138–145. <https://doi.org/10.22616/erdev.2022.21.tf041>.
9. Barbosa V. L., Stuetz R. M. (2013) Performance of Activated Sludge Diffusion for Biological Treatment of Hydrogen Sulphide Gas Emissions. *Water Science and Technology*, 68 (9), 1932–1939. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.444>.
10. Shi L., Yang Q., Xu Z.-Z., Yang C. (2024) Technologies for In-situ H₂S Control in Wastewater Treatment Plants: A Review. *Journal of Water Process Engineering*, 65, 105716. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105716>.
11. Gulshin I. A., Gogina E. S. (2019) Single-sludge System of Advanced Low-oxygen Wastewater Treatment with Nitrogen Compounds Removal. *Voda i Ekologiya: Problemy i Resheniya = Water and Ecology: Problems and Solutions*, 24 (4), 9–19. <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2019.24.4.9-19> (in Russian).
12. Anikin Yu. V., Shilkov V. I. (2018) Modern Materials and Technologies of Industrial Wastewater Treatment. *Russian Journal of Construction Science and Technology*, 4 (2), 22–26. <https://doi.org/10.15826/rjctst.2018.2.004>.
13. Moskvicheva E. V., Voytyuk A. A., Doskina E. P., Ignatkina D. O., Yuryev Yu. Yu., Shchitov D. V. (2015) Improving the Technology of Municipal Wastewater Treatment using a Sorbent Based on Excess Activated Sludge. *Engineering Bulletin of the Don*, 36 (2–2). Available at: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_85_moskvicheva.pdf_c2b9890852.pdf (in Russian).
14. Barbosa V. L., Burgess J. E., Darke K., Stuetz R. M. (2002) Activated Sludge Biotreatment of Sulphurous Waste Emissions. *Re/Views in Environmental Science and Bio/Technology*, 1 (4), 345–362. <https://doi.org/10.1023/A:1023229319150>.
15. Iliev I., Filimonova A., Vlasova A., Kamaliev R., Beloev H. (2024) Desulfurization Technology for Industrial Fuel Gases Using Natural Adsorption Materials. *Engineering Proceedings*, 70 (1), 42. <https://doi.org/10.3390/engproc2024070042>.
16. He X., Chen Y., Gao J., Wang F., Shen B. (2024) Research Progress and Application Prospects of Modified Clay Materials for Flue Gas Pollutants Purification. *Applied Clay Science*, 258, 107483. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2024.107483>.
17. Wal K., Rutkowski P., Stawiński W. (2021) Application of Clay Minerals and their Derivatives in Adsorption from Gaseous Phase. *Applied Clay Science*, 215, 106323. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106323>.
18. Saha B., Vedachalam S., Dalai A. K. (2021) Review on Recent Advances in Adsorptive Desulfurization. *Fuel Processing Technology*, 214, 106685. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106685>.
19. Alcaraz M. G. T., Choia A. E. S., Dugos N. P., Wan M.-W. (2023) A Review on the Adsorptive Performance of Bentonite on Sulfur Compounds. *Chemical Engineering Transactions*, 103, 553–558. <https://doi.org/10.3303/CET23103093>.
20. Zykhova I. V., Panov V. P., Petukhova E. A., Dadaeva A. R. (2004) Extraction of Heavy Metals from Activated Sludge. *Ekologiya i promyshlennost Rossii = Ecology and Industry of Russia*, (11), 34–35 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-367-384>

УДК 662.997

Моделирование и расчет параметров малой гелиотеплицы с целью повышения энергоэффективности

Г. Н. Узаков¹⁾, В. А. Седнин²⁾, А. Б. Сафаров^{1,3)}, Р. А. Мамедов³⁾,
О. И. Рахматов¹⁾

¹⁾Каршинский государственный технический университет

(Карши, Республика Узбекистан),

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

³⁾Бухарский государственный технический университет (Бухара, Республика Узбекистан)

Реферат. В статье представлены результаты исследований, в ходе которых на примере климатических условий Кашкадарьинской области (Республика Узбекистан) разработана методика повышения энергоэффективности двухскатных солнечных теплиц. Литературный анализ показал наличие потенциала экономии энергии в тепличном хозяйстве агропромышленного сектора за счет оптимизации параметров солнечных теплиц. Одновременно показано, что, несмотря на обширность выполненных исследований в ряде стран в данном направлении, требуется продолжение изучения проблемы с выходом на практическое применение параметров их ориентации на местности для различных географических регионов по максимизации воспринимаемой суммарной солнечной радиации. В работе приведен анализ результатов исследований по установлению зависимости суммарной солнечной радиации, падающей на двухскатную теплицу, покрытую стеклом, с полезной площадью 50 м², высотой стен 2 м и высотой ската крыши 1,5 м, от конструктивных параметров последней и траектории движения солнца. Моделирование режимов функционирования гелиотеплицы осуществлено в пакете MATLAB с учетом изменения параметров окружающей среды местности в период с 15 ноября 2023 г. по 15 марта 2024 г. с широтой местности 38,87° и ориентацией от 0 до 90° с интервалом 5°. В результате моделирования определены оптимальные параметры теплицы для приведенного выше периода (азимутальный угол поверхности $\gamma_{\text{опт}} = 45^\circ$, угол наклона поверхности $\beta_{\text{опт}} = 50^\circ$) при максимальной суммарной солнечной радиации за указанный период, равной $\sum I_{\text{max}} = 35660$ МДж, что превышает на 20 % радиацию для теплицы стандартных размеров. Обобщение результатов моделирования позволило разработать методику определения геометрических характеристик (размеров и параметров ориентации) солнечных двухскатных теплиц с заданными климатическими условиями по критерию максимизации падающей суммарной солнечной радиации в зимний период года, которая может быть распространена для применения на другие регионы Узбекистана с целью повышения энергоэффективности агропромышленного сектора.

Ключевые слова: изотропная модель, двухскатная солнечная теплица, суммарная солнечная радиация, угол наклона поверхности, математическое моделирование, угол отклонения солнца

Для цитирования: Моделирование и расчет параметров малой гелиотеплицы с целью повышения энергоэффективности / Г. Н. Узаков [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 4. С. 367–384. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-367-384>

Адрес для переписки

Сафаров Алишер Бекмуродович
Каршинский государственный технический университет
просп. Мустакиллик, 225,
180100, г. Карши, Республика Узбекистан
Тел.: +998 90 299-41-24
a-safarov91@mail.ru

Address for correspondence

Safarov Alisher Bekmurodovich
Karshi State Technical University
225, Mustakillik Ave.,
180100, Karshi, Republic of Uzbekistan
Tel.: +998 90 299-41-24
a-safarov91@mail.ru

Simulation and Calculation of Parameters of a Small Solar Greenhouse in Order to Increase its Energy Efficiency

G. N. Uzakov¹⁾, V. A. Sednin²⁾, A. B. Safarov^{1,3)}, R. A. Mamedov³⁾,
O. I. Rakhmatov¹⁾

¹⁾Karshi State Technical University, (Karshi, Republic of Uzbekistan),

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

³⁾Bukhara State Technical University, (Bukhara, Republic of Uzbekistan)

Abstract: The article presents the results of research, during which using the example of the climatic conditions of the Kashkadarya region (Republic of Uzbekistan) a methodology has been developed to increase the energy efficiency of double-slope solar greenhouses. A literature analysis has shown the potential for energy savings in the greenhouse farming of the agribusiness. At the same time, it is shown that, despite the extensive research carried out in a number of countries in this area, it is necessary to continue studying the problem of putting into practice the parameters of their orientation on the terrain for various geographical regions to maximize the perceived total solar radiation. The paper presents an analysis of the research results on the dependence of the total solar radiation incidence on a gable glass-roofed greenhouse with a usable area of 50 m², a wall height of 2 m and a roof slope height of 1.5 m on the design parameters of the latter and the trajectory of the sun. The simulation of the solar greenhouse operation modes was carried out in the MATLAB package, taking into account changes in the environmental parameters of the area in the period from November 15, 2023 to March 15, 2024 with a latitude of 38.87° and an orientation from 0 to 90° with an interval of 5°. As a result of the simulation, the optimal parameters of the greenhouse were determined for the above period (azimuthal angle of the surface $\gamma_{\text{opt}} = 45^\circ$, angle of inclination of the surface $\beta_{\text{opt}} = 50^\circ$) with the maximum total solar radiation for the specified period equal to $\sum I_{\text{max}} = 35660$ MJ, which exceeds by 20% the radiation for a standard-sized greenhouse. Generalization of the simulation results made it possible to develop a methodology for determining the geometric characteristics (dimensions and orientation parameters) of solar gable greenhouses with specified climatic conditions according to the criterion of maximizing the incident total solar radiation in winter, which can be extended to other regions of Uzbekistan in order to increase the energy efficiency of the agribusiness sector.

Keywords: isotropic model, gable solar greenhouse, total solar radiation incidence, surface tilt angle, mathematical simulation, sun deflection angle

For citation: Uzakov G. N., Sednin V. A., Safarov A. B., Mamedov R. A., Rakhmatov O. I. (2025) Simulation and Calculation of Parameters of a Small Solar Greenhouse in Order to Increase its Energy Efficiency. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (4), 367–384. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-367-384> (in Russian)

Введение

Для агросектора многих стран большое значение имеет повышение энергоэффективности технологических процессов за счет снижения их энергоемкости и вытеснения органического топлива возобновляемыми источниками энергии, а также применения гибридных систем энергообеспечения [1–3], что одновременно приводит к решению экологических проблем. В рамках решения этой проблемы в целом ряде стран ведутся научно-исследовательские работы по разработке новых конструкций гелиотеплиц с учетом климатических условий местности, определению оптимальных размеров и пространственной ориентации, технических решений расширения возможностей использования возобновляемых источников энергии [4, 5].

В исследовании [6] представлены результаты выбора формы и ориентации пяти типов автономных теплиц, ориентированных на применение

в местности с географическими координатами 31° широты и 77° долготы (Республика Индия), модели расчета солнечной радиации, теплового моделирования и экспериментальной апробации.

Автором [6] установлено, что теплица в форме с неравномерным пролетом получает максимальную солнечную радиацию ежемесячно в течение года на всех широтах, в то время как эллиптическая теплица получает минимальную солнечную радиацию. Восточно-западная ориентация во всех географических широтах позволяет наиболее эффективно использовать теплицы круглый год. При этом подсчитано, что теплицы получают больше суммарной солнечной радиации в зимние месяцы и меньше в летние. Также показано, что отличие температуры парникового воздуха в теплице с неравномерным пролетом от температуры воздуха в теплице эллиптической формы составляет $4,6^\circ\text{C}$ (максимум) и $3,5^\circ\text{C}$ (среднее дневное значение) на географической широте 31° [6].

В работе [7] представлены результаты оценки возможности использования пяти типов солнечных теплиц в турецком Байбурте на участках с географическими координатами от $39^\circ 52'$ до $40^\circ 37'$ широты и от $39^\circ 37'$ до $40^\circ 45'$ долготы. Исследованы теплицы с площадью от 50 до 400 м^2 с шагом изменения 50 м^2 и имеющие значение отношения длины теплицы к ширине k от 1 до 10, а азимутальные углы теплицы описаны от 0 до 90° . Высота всех типов теплиц была принята максимум 3 м. Представлена методика определения максимального суммарного солнечного излучения путем кодирования площади каждой поверхности двухскатной теплицы. Установлено, что оптимальная ориентация двухскатной теплицы площадью 50 м^2 составляет 23° , отношение длины теплицы к ширине $k = 3$, а суммарная солнечная радиация составляет 284,26 МДж за сезон.

В [8] предложена математическая модель определения суммарной солнечной радиации в период с 1 ноября по 1 марта для выбора оптимальной формы и ориентации шести различных типов автономных теплиц в южных районах Китая с географической широтой от 20° до $30,6^\circ$. Исходя из того, что максимальная суммарная солнечная радиация на единицу посевных земель в Хайкоу равна $4,1\text{ ГДж/м}^2$, в Фучжоу – $3,8\text{ ГДж/м}^2$, в Ухане – $3,6\text{ ГДж/м}^2$, в результате оптимизации была достигнута экономия затрат за сезон на отопление теплиц, составившая для Хайкоу $46,2\text{ \$/м}^2$, для Фучжоу – $42,9\text{ \$/м}^2$, для Ухани – $40,5\text{ \$/м}^2$. В статье отмечается, что теплицы ориентации восток – запад могут получать максимальное количество суммарной солнечной радиации зимой на всех широтах.

В исследовании [9] получена методика определения оптимальной ориентации гелиотеплиц, расположенных на географической широте местности 44° на территории Белграда (Сербия), которая лучше всего подходит для круглогодичного использования. При этом установлено, что ориентация солнечных теплиц с неравномерным пролетом с востока на запад была наиболее эффективной для всех проанализированных широт.

Авторы [10] провели исследования по определению оптимальных показателей ориентации и структуры теплиц, обеспечивающих восприятие максимального солнечного излучения, установленных на территории Китая. Изучалась зависимость максимального попадания солнечной радиации в теплицу в зависимости от ее высоты. Для г. Шэньян с географической широтой местности 42° оптимальная ориентация $7\text{--}9^\circ$ была рассчита-

на в зависимости от суммарной солнечной радиации и размеров теплицы. Результаты показывают, что регулировка ориентации теплицы позволила сэкономить 1200 кг угля и 432 МДж электроэнергии в год [10].

В [11] представлены результаты исследования по выбору оптимальной ориентации и конструкции теплицы для эффективного использования солнечного излучения с использованием многоцелевого генетического алгоритма. Исследования проводились на севере Ирана для местности с субтропическим климатом (город Рашт). Для расчета солнечной энергии, воспринимаемой теплицей, была разработана анизотропная модель солнечной радиации, основанная на метеорологических данных, оптических свойствах и рассеянии солнечной радиации в теплице с учетом потерь солнечной радиации со всех сторон теплицы. Согласно результатам, лучшее направление для двухскатной теплицы в северной части Ирана восток – запад, оптимальная длина является максимально возможной величиной (максимальное увеличение отношения длины к ширине L/W), независимо от размера площади посевных земель. Оптимальная общая высота солнечной теплицы и угол наклона крыши 3,6 м и 14° . Следует отметить, что модель, разработанная в этом исследовании, может быть расширена для других мест и климатов путем замены соответствующих метеорологических данных рассматриваемого месторасположения [11].

Авторы [12] провели исследования по сравнительному изучению влияние формы и ориентации трех типов теплиц в климатических условиях региона Марракеш (Королевство Марокко). Математическая модель для расчета общего количества часов солнечной радиации, получаемой каждой теплицей в течение года, разработана для ориентации север – юг и восток – запад. Размеры различных типов теплиц (длина, ширина и высота) принимались одинаковыми. Почасовая и ежемесячная солнечная радиация рассчитывалась индивидуально для всех изученных типов и направлений теплиц. По результатам исследования установлено, что теплицы типа «неравномерный пролет» с углом наклона крыши 12° , двухскатной с углом наклона 17° и эллиптического типа считаются оптимальными и получают максимальную солнечную радиацию. Теплица с «неравномерным пролетом» получает на 3,11 и 34,88 % больше годовой солнечной радиации, чем теплицы двухскатная и эллиптическая соответственно [12].

Результаты научных исследований, направленных на определение оптимальных конструкций солнечных теплиц в условиях изменяющегося климата с разработкой математических моделей для определения интенсивности и объема воспринимаемого солнечного излучения, а также технических решений по повышению энергоэффективности представлены также в целом ряде других работ [13–20]. Это подчеркивает актуальность проблемы, с одной стороны, и целесообразность продолжения исследований по определению оптимальных конструктивных размеров гелиотеплиц и разработке методик определения воспринимаемой суммарной солнечной радиации в зависимости от их ориентации для других климатических условий, в частности для условий резко континентального климата, с другой.

Описания объекта исследования и исходные данные

В качестве объекта исследования выбрана двухскатная солнечная теплица с полезной поверхностью 50 м^2 , шириной $2 \leq W_i \leq 7,1 \text{ м}$, длиной $7,1 \leq L_i \leq 25 \text{ м}$, с высотой стен 2 м и высотой ската крыши $1,5 \text{ м}$, покрытая стеклом. Расчеты проводились для периода с 15 ноября 2023 г. по 15 марта 2024 г., местоположение теплицы по географической широте $38,87^\circ$ (условия г. Карши), ориентация от 0 до 90° с интервалом изменения направления 5° .

На рис. 1 показана динамика изменения температуры и солнечной радиации на горизонтальную поверхность г. Карши в 2023 г. Самая высокая температура составила 26°C , средняя температура 20°C , минимальная температура -10°C , максимальная солнечная радиация 825 Вт/м^2 [21].

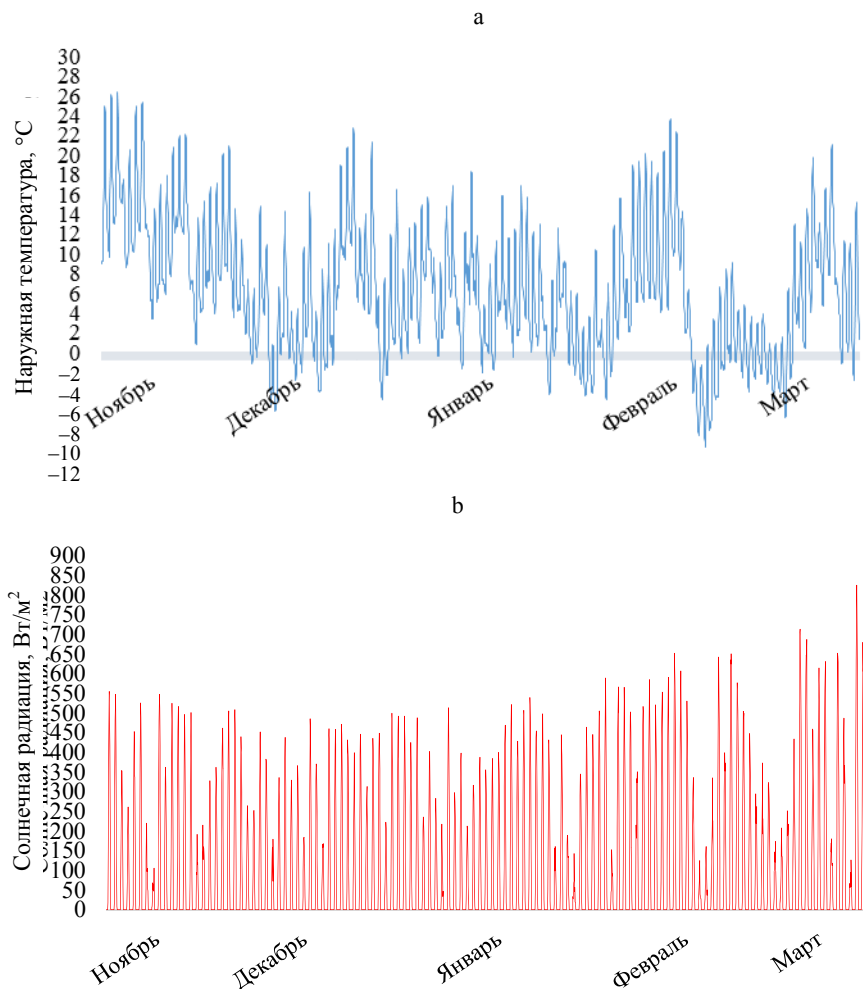


Рис. 1. Динамика изменения температуры наружного воздуха в г. Карши (а)
и падающей солнечной радиации на горизонтальную поверхность (б)

Fig. 1. Dynamics of temperature change in the city of Karshi (a) and solar radiation incidence on a horizontal surface (b)

На рис. 2 приведены схема двухскатной теплицы (а) и изменение азимутального угла поверхности для разных ее частей (б). Для каждой стороны теплицы рассчитано максимальное падение солнечной радиации. Для определения ориентации и конструктивных размеров построена 3D модель солнечной двухскатной теплицы (рис. 3).

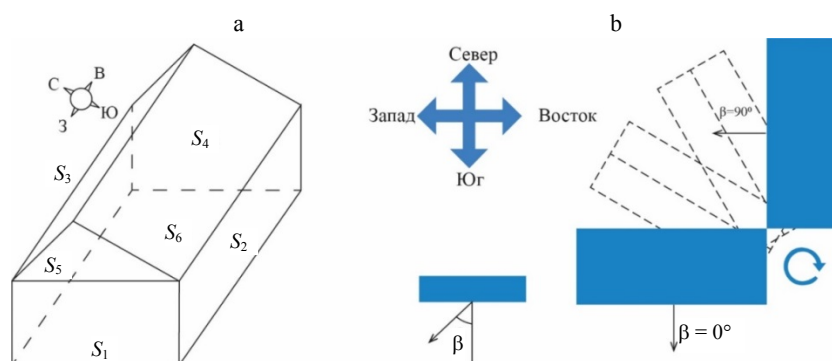


Рис. 2. Схема двухскатной теплицы (а) и изменение азимутального угла поверхности для разных ее частей (б)

Fig. 2. Diagram of a gable greenhouse (a) and change in the azimuth angle of the surface for different parts of the greenhouse (b)

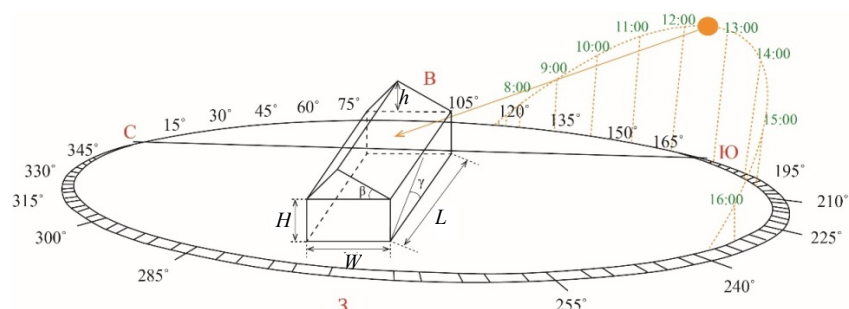


Рис. 3. Трехмерная модель определения ориентации и конструктивных размеров солнечной теплицы

Fig. 3. Three-dimensional model for determining the optimal orientation and design dimensions of a solar greenhouse

Методика определения воспринимаемой теплицей солнечной энергии

Математические выражения расчета конструктивных размеров солнечной теплицы представляются в виде:

$$S_1 = S_4 = WH + \frac{Wh}{2}; \quad (1)$$

$$S_2 = S_5 = LH; \quad (2)$$

$$S_3 = S_6 = dL = \frac{WL}{2\operatorname{tg}\beta}; \quad (3)$$

$$V = WL \left(H + \frac{h}{2} \right); \quad (4)$$

$$k_i = \frac{L_i}{W_i}, \quad 1 \leq k_i \leq 12,5; \quad (5)$$

$$\beta_i = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{1,5 \cdot 2}{W_i} \right), \quad (23^\circ \leq \beta_i \leq 56^\circ). \quad (6)$$

Здесь $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ – площади поверхностей элементов теплицы и угол наклона поверхности β .

Известно, что видимое положение солнца относительно плоскости земли изменяется в зависимости от нескольких геометрических параметров. Угол склонения солнца δ относительно выбранного дня n определяется из уравнения [22]

$$\delta = 23,45 \sin \left(\frac{360(n + 284)}{365} \right). \quad (7)$$

В табл. 1 представлен алгоритм определения числа выбранного дня в месяце, который понадобится при определении угла склонения солнца, и показатели углов склонения солнца.

Часовые углы восхода и заката определяются из выражения [23]

$$\omega_{1,2} = \pm \arccos(-\operatorname{tg}\phi \operatorname{tg}\delta). \quad (8)$$

Таблица 1

Алгоритм определения числа дней в месяце
Algorithm for determining the number of days in a month

Месяц	Выбор количества дней в месяце	Номер выбранного дня месяца	Номер выбранного дня года n	Угол склонения солнца δ
Январь	i	17	17	$-20,9$
Февраль	$31 + i$	16	47	$-13,0$
Март	$59 + i$	16	75	$-2,4$
Апрель	$90 + i$	15	105	$9,4$
Май	$120 + i$	15	135	$18,8$
Июнь	$151 + i$	11	162	$23,1$
Июль	$181 + i$	17	198	$21,2$
Август	$212 + i$	16	228	$13,5$
Сентябрь	$243 + i$	15	258	$2,2$
Октябрь	$273 + i$	15	288	$-9,6$
Ноябрь	$304 + i$	14	318	$-18,9$
Декабрь	$334 + i$	10	344	$-23,0$

На наклонных поверхностях с различной ориентацией часовая солнечная радиация рассчитывалась с помощью простых геометрических соотношений между горизонтальной и наклонной поверхностями, а диффузная часовая солнечная радиация – с использованием модели Луи и Джордана. Суммарная солнечная радиация, падающая на каждую поверхность солнечной теплицы, является функцией ряда углов: угла падения солнечной радиации на поверхность θ , угла склонения солнца δ , угла солнечных часов ω , угла азимута поверхности (ориентация) γ , угла географической широты расположения теплицы φ и угла наклона поверхности β .

Количество суммарной солнечной радиации, падающей на теплицу, равно суммарной солнечной радиации, падающей на каждую сторону поверхности теплицы:

$$I = \sum I_{hi}(\beta_i, k_i, \gamma_i) S_i. \quad (10)$$

В исследовании использовался изотропный метод определения среднемесячного суммарного солнечного излучения на различных поверхностях солнечной теплицы [24–26], согласно которому имеем

$$I_h = R_b I_b + I_d R_d + \rho_q I_H R_q, \quad (11)$$

где R_b – геометрический фактор (коэффициент наклона); R_d , R_q – коэффициенты, зависящие от угла наклона поверхности β .

Ввиду того что углы восхода и захода солнца меняются в зависимости от угла наклона и азимута, зависимость геометрического фактора R_b от двух часовых углов ω_1 и ω_2 ($\omega_2 > \omega_1$) выглядит следующим образом [27]:

$$R_b = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \cos \theta_i d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \cos \theta_z d\omega} = \frac{a}{b}, \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} a = & \frac{\pi}{180} (\sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma) (\omega_2 - \omega_1) + \\ & + (\cos \delta \cos \varphi \cos \beta + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma) (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) - \\ & - (\cos \delta \sin \beta \sin \gamma) (\cos \omega_2 - \cos \omega_1); \end{aligned} \quad (13)$$

$$b = \frac{\pi}{180} (\cos \delta \cos \varphi (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) - \sin \delta \sin \varphi (\omega_2 - \omega_1)). \quad (14)$$

Коэффициенты R_d и R_q вычисляются на основе модели Луи и Джордана по следующим формулам [28]:

$$R_d = \frac{1 + \cos \beta}{2}; \quad (15)$$

$$R_q = \frac{1 - \cos \beta}{2}. \quad (16)$$

Часовой индекс ясности k_T определяется отношением дневной суммы излучения, падающего на горизонтальную поверхность в заданный день, к дневной сумме заатмосферного излучения:

$$k_T = \frac{I_H}{I_0}. \quad (17)$$

Часовое заатмосферное солнечное излучение I_0 рассчитаем по формуле [29]

$$I_0 = \frac{12 \cdot 3600}{\pi} I_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right) \times \left[\cos \delta \cos \varphi (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi (\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \delta \sin \varphi \right]. \quad (18)$$

Корреляцию функции часового индекса ясности для фактора диффузного солнечного излучения определяем из выражения, разработанного Эрбсом [30] для местностей с географической широтой от 31° до 42° , что соответствует географической широте г. Карши $38,87^\circ$:

$$\frac{I_d}{I_H} = \begin{cases} 1 - 0,09k_T, & \text{если, } 22 \succ k_T; \\ 0,915 - 0,16044k_T + 4,388k_T^2 - 16,638k_T^3 + \\ + 12,336k_T^4, & \text{если, } 22 \prec k_T \prec 0,8; \\ 0,165, & \text{если, } 22 \succ k_T \succ 0,8. \end{cases} \quad (19)$$

Среднее значение солнечного излучения, падающего на горизонтальную поверхность I_b , определяем как разность дневного суммарного излучения I_H и диффузного излучения I_d

$$I_b = I_H - I_d. \quad (20)$$

Суммарное солнечное излучение, достигающее каждой поверхности солнечной теплицы, состоит из прямого, диффузного и отраженного. В целом проницаемость покрытия для каждой поверхности теплицы для этих трех компонентов разная и во многом зависит от оптических свойств материала покрытия. Эти оптические свойства включают угол преломления света θ_2 , коэффициент затухания K для стекла 32 м^{-1} и толщину покры-

тия L , равную 10 мм. Коэффициент пропускания солнечного света [31] определяется математическим выражением следующего вида:

$$r = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{KL}{\cos\theta_2}\right) \left[\frac{1-r_{\parallel}}{1+r_{\parallel}} + \frac{1-r_{\perp}}{1+r_{\perp}} \right]; \quad (21)$$

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_i)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_i)}; \quad (22)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_i)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_i)}. \quad (23)$$

Здесь угол преломления луча θ_2 является функцией угла падения солнечного света θ_i , а показатель преломления среды n_2 рассчитывается по закону Снелла следующим образом (для воздуха $n_1 = 1$ и для стекла $n_2 = 1,53$):

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_2. \quad (24)$$

Для диффузного солнечного излучения и солнечного излучения, отраженного от почвы, θ_i заменяется соответствующими средними углами падения θ_d и θ_g , которые являются функцией угла наклона поверхности β , как показано ниже [32]:

$$\theta_d = 59,7 - 0,1388\beta + 0,001497\beta^2; \quad (25)$$

$$\theta_g = 90 - 0,5788\beta + 0,002693\beta^2. \quad (26)$$

Часть суммарного солнечного излучения I_h , получаемого покрытием солнечной теплицы, отражается в воздух ρI_h , а оставшаяся часть поступает внутрь теплицы, где попадает на посевную площадь или на ее различные части конструкции. Внутренняя часть тепличного покрытия разделена на два вида компонентов, которые отражаются либо в тепличную систему, либо через покрытие в воздух. При этом, если предположить, что в теплице нет растений, часть того, что попадает на тепличную посевную площадь, поглощается почвой и теряется под землей, а остальная часть отражается в теплицу посредством конвекции, испарения и излучения. Части солнечного излучения (от посевной земли и стен), возвращаемые в тепличную среду, вызывают парниковый эффект и повышают температуру воздуха. Доля солнечной радиации, поглощаемой посевной землей, является основным фактором парниковых температур и парникового эффекта, поэтому учет этого эффекта приводит к снижению требуемого количества энергии при моделировании процесса выращивания продуктов в теплице. На рис. 4 показана схема попадания солнечного света и его распределение в теплице.

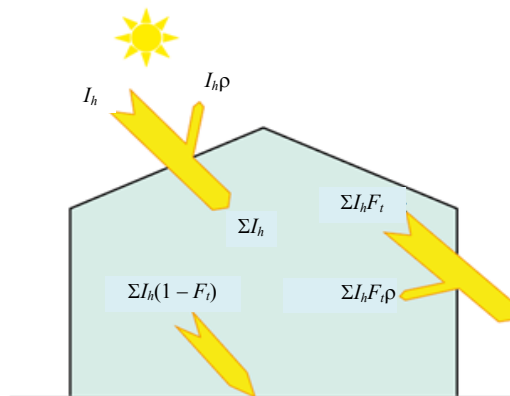


Рис. 4. Схема рассеивания солнечного света в теплице

Fig. 4. Scheme of sunlight diffusion in a greenhouse

Основываясь на расчетной проводимости различных компонентов солнечного излучения, часть солнечного излучения, передаваемого между часовыми углами ω_1 и ω_2 внутри парника I_h , можно вычислить следующим образом [33]:

$$\Sigma I_h = S_i (I_b R_b \tau_b + I_d R_d \tau_d + \rho_q I_H R_q \tau_q). \quad (27)$$

Согласно распределению солнечного излучения в теплице, описанному на схеме (рис. 4), солнечный свет, попадающий в теплицу, состоит из двух частей: той части солнечного излучения, которая достигает Земли I_1 , и той части света, которая отражается от поверхностей солнечной теплицы I_2 . Общее количество суммарной солнечной радиации, передаваемой в тепличной системе, выражается как:

$$\Sigma I = I_1 + I_2; \quad (28)$$

$$I_1 = \Sigma I_h (1 - F_t); \quad (29)$$

$$I_2 = \Sigma I_h \rho F_t. \quad (30)$$

Общая солнечная доля F_t изменяется каждый час дня и уменьшается с увеличением размера (длины) посевной площади для всех типов теплиц. Общая солнечная доля в зимние месяцы для двухскатных теплиц в исследованиях оценивалась в среднем 0.35, а коэффициент отражения света (ρ) – 0.1 [34].

На основе представленных зависимостей разработан алгоритм численного моделирования, позволяющий определить максимальную суммарную падающую солнечную радиацию на двухскатную теплицу.

Результаты и обсуждение

Для расчета количества суммарной часовой солнечной радиации, воспринимаемой теплицей в любое время года в г. Карши, в программе MATLAB R2023b разработан скрипт (а) и проведен регрессионный анализ (б) (рис. 5). При этом входные параметры зависят от: выбранного дня,

угла наклона поверхности, широты расположения теплицы, ориентации, коэффициента отражения света почвой, доли солнечного излучения и падения солнечного света на горизонтальную поверхность.

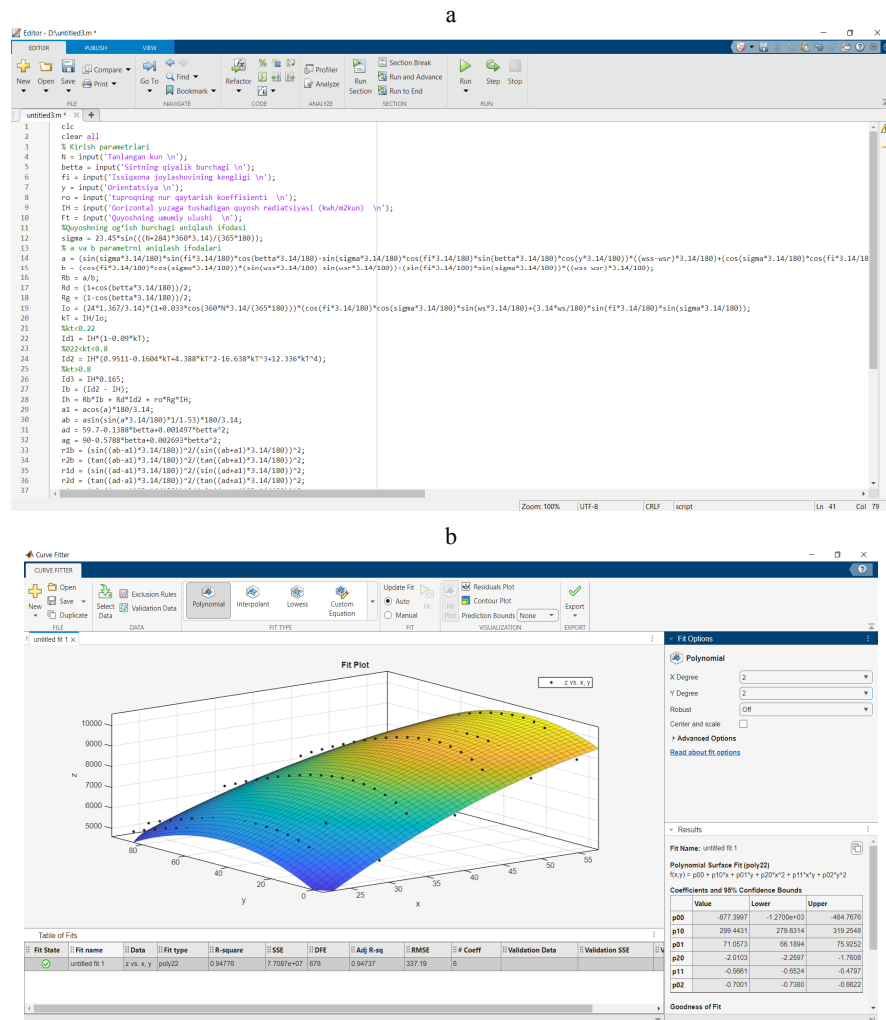


Рис. 5. Скрипт, разработанный в MATLAB R2023b (а), и регрессионный анализ (б)

Fig. 5. Script developed in MATLAB R2023b (a) and regression analysis (b)

На рис. 6 показано, как максимальное суммарное среднесуточное солнечное излучение, падающее на двухскатную теплицу с полезной площадью 50 м^2 , моделируется на основе регрессионного анализа в пакете MATLAB с учетом зависимости угла наклона теплицы и ориентации за ноябрь (а), декабрь (б), январь (с), февраль (д) и март (е). При этом численные значения средней суммарной солнечной радиации теплицы для ноября, декабря, января, февраля и марта представлены в табл. 2.

В результате моделирования определены оптимальные параметры теплицы для вышеприведенного периода: азимутальный угол поверхности $\gamma_{\text{опт}} = 45^\circ$, ее угол наклона $\beta_{\text{опт}} = 50^\circ$, максимальная суммарная солнечная радиация за данный период составляет $\sum I_{\text{max}} = 35660 \text{ МДж}$.

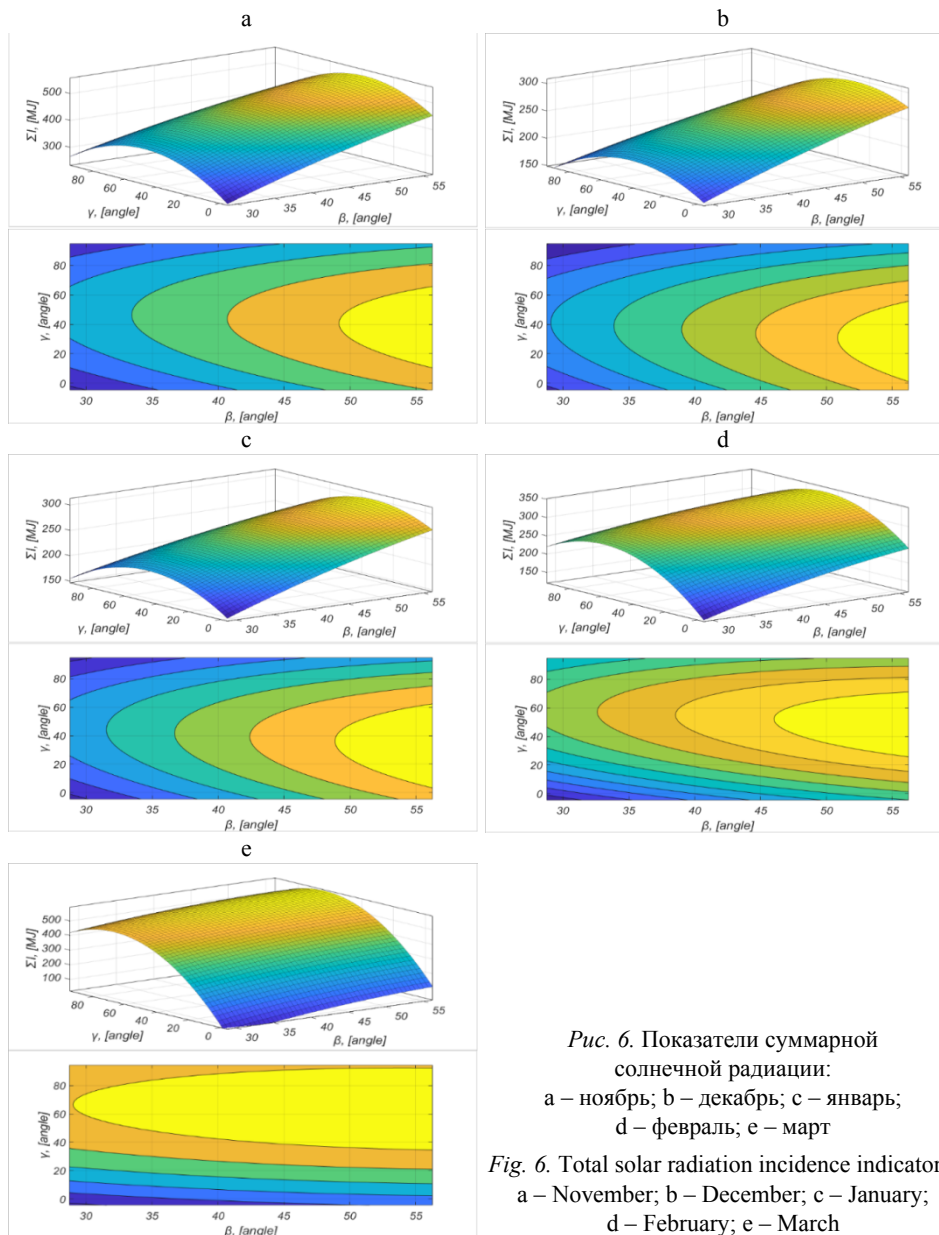


Рис. 6. Показатели суммарной
солнечной радиации:
а – ноябрь; б – декабрь; с – январь;
д – февраль; е – март

Fig. 6. Total solar radiation incidence indicators:
а – November; б – December; с – January;
д – February; е – March

Таблица 2

Средняя суммарная солнечная радиация
Average total solar radiation incidence

Месяц	Азимутальный угол поверхности $\gamma_1, ^\circ$	Угол наклона поверхности β_1 , град.	Средняя суммарная солнечная радиация ΣI_{YQR1} , МДж/мес.
Ноябрь	40	52	4617
Декабрь	30	53	9502
Январь	38	52	8641
Февраль	52	52	8343
Март	65	41	4559

На рис. 7 показаны результаты сравнения суммарной солнечной радиации, падающей на стандартную ($\beta = 60^\circ$; $\gamma = 0^\circ$) и предложенную нами ($\beta = 50^\circ$, $\gamma = 45^\circ$) теплицы с одинаковыми конструктивными размерами. Из графика видно, что в период с 15 ноября по 15 марта на предложенную нами теплицу будет приходиться в общей сложности 35660 МДж солнечной радиации, а на стандартную теплицу – 28600 МДж, т. е. предложенная теплица позволяет повысить ее энергоэффективность на 20 %.

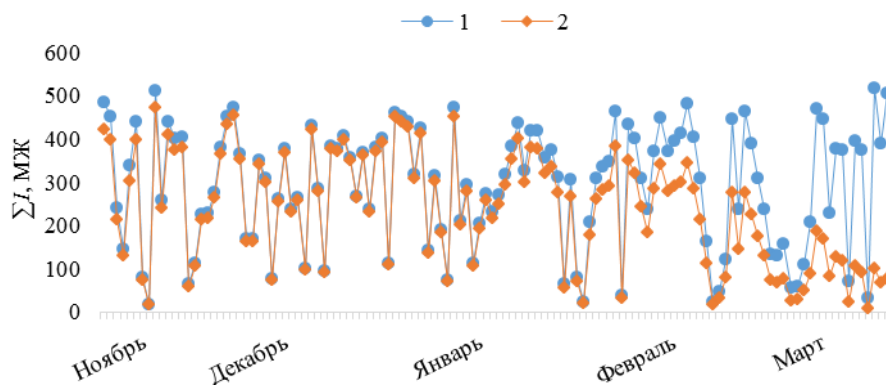


Рис. 7. Результаты сравнения двух теплиц стандартной и разработанной:

- 1 – результаты, полученные при оптимизации;
2 – то же, полученные в стандартном положении

Fig. 7. Results of comparison of two greenhouses, viz. the standard one and the developed one:
1 – the results obtained during optimization; 2 – the results obtained in the standard position

ВЫВОДЫ

1. Моделирование режимов функционирования солнечной теплицы, выполненное в пакете MATLAB с учетом изменения параметров окружающей среды местности в период с 15 ноября 2023 г. по 15 марта 2024 г. для г. Карши ($38,87^\circ$ географическая широта и $65,80^\circ$ долгота, ориентация от 0 до 90° с интервалом 5°), позволило установить ее оптимальные параметры: азимутальный угол поверхности, равный $\beta_{\text{опт}} = 50^\circ$, максимальную суммарную солнечную радиацию за данный период, которая составила 35660 МДж, что на 20 % выше по сравнению со стандартным вариантом ($\beta = 60^\circ$; $\gamma = 0^\circ$) с одинаковыми конструктивными размерами.

2. Обобщение результатов моделирования позволило разработать методику определения геометрических характеристик (размеров и параметров ориентации) солнечных двухскатных теплиц по заданным климатическим условиям по критерию максимизации падающей суммарной солнечной радиации в зимний период года, которая может быть распространена для применения на другие регионы Узбекистана с целью повышения энергоэффективности агропромышленного сектора

Обозначения:

S_i – площадь падающей солнечной радиации в теплицу, м^2 ; I_H – суммарная солнечная радиация, падающая на горизонтальную поверхность, $\text{Вт}/\text{м}^2$; n – номер выбранного дня; k_i – отношение ширины основания теплицы к ее длине, коэффи-

циенты ограждения; δ – угол склонения солнца, град.; β – угол наклона поверхности, град.; θ – угол падения солнечной радиации на поверхность, град.; γ – азимутальный угол поверхности (ориентация), град.; φ – широта расположения теплицы, град.; I_{SC} – внеземное солнечное излучение, Вт/м²; k_T – коэффициент прозрачности; F_t – общая солнечная доля, коэффициент; ρ_g – коэффициент отражения света для почвы; V – объём теплицы, м³; W – ширина основания теплицы, м; H – высота стен теплицы, м; h – высота крыши теплицы, м; L – длина основания теплицы, м;

Научная работа поддержана со стороны фундаментального проекта, реализованного в рамках узбекско-белорусского сотрудничества IL-4821091659 «Разработка научно-технических основ гибридных систем теплоснабжения с учетом метеорологических особенностей климата местности» в 2022–2024 гг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Математическое моделирование комбинированной системы теплоснабжения солнечного дома / Г. Н. Узаков, В. Л. Червинский, У. Х. Ибрагимов [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 5. С. 412–421. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-65-5-412-421>.
2. Седнин, А. В. Проблемы развития гибридных систем теплоснабжения / А. В. Седнин, К. М. Дюсенов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 2. С. 173–188. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-173-188>.
3. CFD-моделирование аэродинамического профиля лопастей ветроэнергетической установки с вертикальной осью в системе Ansys Fluent / Г. Н. Узаков, В. А. Седнин, А. Б. Сафаров [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 2. С. 97–114. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-97-114>.
4. Safarov, A. B. Autonomous Heat-Cooling and Power Supply System Based on Renewable Energy Devices (Trigeneration System) / A. B. Safarov, O. I. Rakhmatov, Y. G. Uzakova // BIO Web of Conferences. 2023. Vol. 71. P. 02030. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20237102030>.
5. Development of a System for Modeling the Design and Optimization of the Operation of a Small Hydroelectric Power Station / G. N. Uzakov, Z. E. Kuziev, A. B. Safarov, R. A. Mamedov // Digital and Information Technologies in Economics and Management. DITEM 2023 / ed. A. Gibadullin. Springer, Cham, 2024. P. 243–252. (Lecture Notes in Networks and Systems; vol. 942). https://doi.org/10.1007/978-3-031-55349-3_20.
6. Sethi, V. P. On the Selection of Shape and Orientation of a Greenhouse: Thermal Modeling and Experimental Validation / V. P. Sethi // Solar Energy. 2009. Vol. 83, № 1. P. 21–38. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.05.018>.
7. Çakır, U. Using Solar Greenhouses in Cold Climates and Evaluating Optimum Type According to Sizing Position and Location: A Case Study / U. Çakır, E. Şahin // Computers and Electronics in Agriculture. 2015. Vol. 117. P. 245–257. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.005>.
8. Chen J. A Mathematical Model of Global Solar Radiation to Select the Optimal Shape and Orientation of the Greenhouses in Southern China / J. Chen, Y. Ma, Z. Pang // Solar Energy. 2020. Vol. 205, № 6. P. 380–389. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.055>.
9. Dragichevich, S. M. Determining the Optimum Orientation of a Greenhouse on the Basis of the Total Solar Radiation Availability / S. M. Dragichevich // Thermal science. 2011. Vol. 15, № 1. P. 215–221. <https://doi.org/10.2298/tsci100220057d>.
10. Effects of Orientation and Structure on Solar Radiation Interception in Chinese Solar Greenhouse / D. Xu, Y. Li, Y. Zhang [et al.] // PLOS ONE. 2020. Vol. 15, № 11. Art. e0242002. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242002>.
11. Optimal Solar Greenhouses Design Using Multiobjective Genetic Algorithm / B. M. Karambasti, M. Naghashzadegan, M. Ghodrat, A. Lalbakhsh // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 73728–73742. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3189348>.
12. A comparative study of greenhouse shapes and orientations under the climatic conditions of Marrakech, Morocco / A. Mellalou, A. Mouaky, A. Bacaoui, A. Outzourhit // International Journal of Environmental Science and Technology. 2022. Vol. 19. P. 6045–6056. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03556-z>.
13. Пенджиев, А. М. Математическая модель расчета температурного режима листа в условиях солнечной теплицы / А. М. Пенджиев // Альтернативная энергетика и экология. 2010. № 11. С. 65–68.

14. Вардиашвили, А. Б. Гидравлический и теплотехнический расчет подпочвенной аккумуляющей системы гелиотеплиц / А. Б. Вардиашвили, В. Д. Ким // Гелиотехника. 1980. № 6. С. 48–53.
15. Modeling the Heat Balance of a Solar Greenhouse with a Passive Heat Accumulator / A. G. Khalimov, B. E. Khairiddinov, V. D. Kim, G. G. Khalimov // *Applied Solar Energy*. 2013. Vol. 49, No 4. P. 211–214. <https://doi.org/10.3103/S0003701X13040063>.
16. Study of the Thermal Regime of Solar Greenhouses for the Individual Purpose for Their Design Features / Sh. I. Klychev, B. S. Rasakhodzhaev, Zh. Z. Akhadov [et al.] // *Applied Solar Energy*. 2022. Vol. 58, No. 1. P. 121–126. <https://doi.org/10.3103/S0003701X22010091>.
17. Akhatov, J. S. Numerical Calculations of Heat Engineering Parameters of a Solar Greenhouse Dryer / J. S. Akhatov, A. S. Halimov // *Applied Solar Energy*. 2015. Vol. 51, No 2. P. 107–111. <https://doi.org/10.3103/S0003701X15020024>.
18. Samiev, K. A. Study of the Performance of Greenhouse with Short Term Heat Storage and Night Insulation / K. A. Samiev, J. S. Akhatov // *Proceedings of the ISES Solar World Congress*, 2011. P. 826–830. <https://doi.org/10.18086/swc.2011.15.11>.
19. Investigation of Solar Greenhouses with Transformable (Adjustable) Body Depending on Indoor and Outdoor Air Temperature / B. S. Rasakhodzhaev, U. Z. Akhmadjanov, M. O. Bo-boeva [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1070, No 1. Art. 012030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1070/1/012030>.
20. About the Production of Lemons Grown in an Autonomous Gabled Solar Greenhouse / I. A. Yuldashev, B. M. Botirov, N. S. Kholmirezayev, Y. M. Qurbanov // *Applied Solar Energy*. 2023. Vol. 59, No 1. P. 44–47. <https://doi.org/10.3103/S0003701X23600431>.
21. Nasa Power. Data Access Viewer (DAV). URL: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer>.
22. Assessment of Solar Radiation on Diversely Oriented Surfaces and Optimum Tilts for Solar Absorbers in Malaysian Tropical Latitude / K. M. Ng, N. M. Nor Mariah Adam, O. Inayatullah, M. Z. Ab Kadir // *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2014. Vol. 5, No 1. <https://doi.org/10.1007/s40095-014-0075-7>.
23. Kendirli, B. Structural Analysis of Greenhouses: A Case Study in Turkey / B. Kendirli // *Building and Environment*. 2006. Vol. 41. P. 864–871. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.013>.
24. Hailu, G. Optimum Tilt Angle and Orientation of Photovoltaic Thermal System for Application in Greater Toronto Area, Canada / G. Hailu, A. S. Fung // *Sustainability*. 2019. Vol. 11, No 22. P. 6443. <https://doi.org/10.3390/su11226443>.
25. Gheyrati, M. Optimum Orientation of the Multi-Span Greenhouse for Maximum Capture of Solar Energy in Central Region of Iran / M. Gheyrati, A. Akram, H. Ghasemi-Mobtaker // *Journal of Renewable Energy and Environment*. 2022. Vol. 9, No. 3. P. 65–74. <https://doi.org/10.30501/jree.2022.305780.1259>.
26. Gairaa, K. Maximisation and Optimisation of the Total Solar Radiation Reaching the Solar Collector Surfaces / K. Gairaa // *Progress in Clean Energy* / eds.: I. Dincer, C. Colpan, O. Kizilkan, M. Ezan. Springer, Cham, 2015. Vol. 2. P. 873–886. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17031-2_57.
27. Duffie, J. A. *Solar Engineering of Thermal Processes* / J. A. Duffie, W. A. Beckman. New Jersey: John Wiley & Son, 2013. 944 p. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>.
28. Optimization of Angle of Inclination of the Hybrid Photovoltaic-Thermal Solar Collector Using Particle Swarm Optimization Algorithm / T. Ismail, K. Touafek, N. Bellel, N. Bouarroudj // *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2014. Vol. 6, iss. 5. Art. 053116. <https://doi.org/10.1063/1.4896956>.
29. Jafarkazemi, F. Optimum Tilt Angle and Orientation of Solar Surfaces in Abu Dhabi, UAE / F. Jafarkazemi, A. S. Saadabadi // *Renewable Energy*. 2013. Vol. 56. P. 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.10.036>.
30. Singh, R. D. Energy conservation in the greenhouse system: A steady state analysis / R. D. Singh, G. N. Tiwari // *Energy*. 2010. Vol. 35, iss. 6. P. 2367–2373. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.003>.
31. Solar Energy Conservation in Greenhouse: Thermal Analysis and Experimental Validation / H. G. Mobtaker, Y. Ajabshirchi, S. F. Ranjbar, M. Matloobi // *Renewable Energy*. 2016. Vol. 96, Part A. P. 509–519. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.079>.
32. Optimum Design and Orientation of a Greenhouse for Seasonal Winter Drying in Morocco under Constant Volume Constraint / A. Mellalou, W. Riad, A. Mouaky [et al.] // *Solar Energy*. 2021. Vol. 230. P. 321–332. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.050>.

33. El-Maghlany, W. M. Optimum Design and Orientation of the Greenhouses for Maximum Capture of Solar Energy in North Tropical Region / W. M. El-Maghlany, M. A. Teamah, H. Tanaka // *Energy Conversion and Management*. 2015. Vol. 105. P. 1096–1104. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.066>.
34. Karambasti, B. M. Optimum Design of a Greenhouse for Efficient use of Solar Radiation Using a Multi-Objective Genetic Algorithm / B. M. Karambasti // *Energy Efficiency*. 2022. Vol. 15, № 8. Art. 66. <https://doi.org/10.1007/s12053-022-10073-6>.

Поступила 14.01.2025 Подписана в печать 18.03.2025 Опубликовано онлайн 31.07.2025

REFERENCES

1. Uzakov G. N., Charvinski V. L., Ibragimov U. Kh., Khamraev S. I., Kamolov B. I. (2022) Mathematical Modeling of the Combined Heat Supply System of a Solar House. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (5), 412–421. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-65-5-412-421> (in Russian).
2. Sednin A. V., Dyussenov K. M. (2024) Development of Hybrid District Heating Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (2), 173–188. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-173-188> (in Russian).
3. Uzakov G. N., Sednin V. A., Safarov A. B., Mamedov R. A., Khatamov I. A. (2024) CFD-Modeling of the Airfoil of the Blades of a Wind Power Plant with a Vertical Axis in the Ansys Fluent System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (2), 97–114. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-97-114> (in Russian).
4. Safarov A. B., Rakhmatov O. I., Uzakova Y. G. (2023) Autonomous Heat-Cooling and Power Supply System Based on Renewable Energy Devices (Trigeneration System). *BIO Web of Conferences*, 71, 02030. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20237102030>.
5. Uzakov G. N., Kuziev Z. E., Safarov A. B., Mamedov R. A. (2024) Development of a System for Modeling the Design and Optimization of the Operation of a Small Hydroelectric Power Station. Gibadullin A. (ed.). *Digital and Information Technologies in Economics and Management. DITEM 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, 942, p. 243–252. https://doi.org/10.1007/978-3-031-55349-3_20.
6. Sethi V. P. (2009) On the Selection of Shape and Orientation of a Greenhouse: Thermal Modeling and Experimental Validation. *Solar Energy*, 83 (1), 21–38. <https://doi.org/10.1016/j.soler.2008.05.018>.
7. Çakır U., Şahin E. (2015) Using Solar Greenhouses in Cold Climates and Evaluating Optimum Type According to Sizing, Position and Location: A Case Study. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 117, 245–257. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.005>.
8. Chen J., Ma Y., Pang Z. (2020) A Mathematical Model of Global Solar Radiation to Select the Optimal Shape and Orientation of the Greenhouses in Southern China. *Solar Energy*, 205 (6), 380–389. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.055>.
9. Dragichevich S. M. (2011) Determining the Optimum Orientation of a Greenhouse on the Basis of the Total Solar Radiation Availability. *Thermal Science*, 15 (1), 215–221. <https://doi.org/10.2298/tsci100220057d>.
10. Xu D., Li Y., Zhang Y., Xu H., Li T. (2020) Effects of Orientation and Structure on Solar Radiation Interception in Chinese Solar Greenhouse. *PLOS ONE*, 15 (11), e0242002. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242002>.
11. Karambasti B. M., Naghashadegan M., Ghodrat M., Lalbakhsh A. (2022) Optimal Solar Greenhouses Design Using Multiobjective Genetic Algorithm. *IEEE Access*, 10, 73728–73742. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3189348>.
12. Mellalou A., Mouaky A., Bacaoui A., Outzourhit A. A (2022) Comparative Study of Greenhouse Shapes and Orientations Under the Climatic Conditions of Marrakech, Morocco. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 6045–6056. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03556-z>.
13. Penjiyev A. M. (2010) Mathematical Model of Sheet Temperature Mode Calculation in Hot-House Conditions. *International Scientific Journal for alternative energy and Ecology (IS-JAEE)*, (11), 65–68 (in Russian).
14. Vardiashvili A. B., Kim V. D. (1980) Hydraulic and Thermal Calculation of the Subsoil Storage System of Solar Greenhouses. *Geliotekhnika*, (6), 48–53 (in Russian).

15. Khalimov A. G., Khairiddinov B. E., Kim V. D., Khalimov G. G. (2013) Modeling the Heat Balance of a Solar Greenhouse with a Passive Heat Accumulator. *Applied Solar Energy*, 49 (4). 211–214. <https://doi.org/10.3103/S0003701X13040063>.
16. Klychev S. I., Rasakhodzhaev B. S., Akhadov, Z. Z., Akhmadjonov U. Z., Adylov Ch. A. (2022) Study of the Thermal Regime of Solar Greenhouses for the Individual Purpose for Their Design Features. *Applied Solar Energy*, 58 (1), 121–126. <https://doi.org/10.3103/S0003701X22010091>.
17. Akhatov Z. S., Khalimov A. S. (2015) Numerical Calculations of Heat Engineering Parameters of a Solar Greenhouse Dryer. *Applied Solar Energy*, 51 (2), 107–111. <https://doi.org/10.3103/S0003701X15020024>.
18. Samiev K. A., Akhatov J. S. (2011) Study of the Performance of Greenhouse with Short Term Heat Storage and Night Insulation. *Proceedings of the ISES Solar World Congress*, 826–830. <https://doi.org/10.18086/swc.2011.15.11>.
19. Rasakhodzhaev B. S., Akhmadjanov U. Z., Boboeva M. O., Mashrapova I. R., Tokonova T. S. (2022) Investigation of Solar Greenhouses with Transformable (Adjustable) Body Depending on Indoor and Outdoor Air Temperature. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1070 (1), 012030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1070/1/012030>.
20. Yuldashev I. A., Botirov B. M., Kholmirezayev N. S., Qurbanov Y. M. (2023) About the Production of Lemons Grown in an Autonomous Gabled Solar Greenhouse. *Applied Solar Energy*, 59 (1), 44–47. <https://doi.org/10.3103/S0003701X23600431>.
21. *Nasa Power. Data Access Viewer (DAV)*. Available at: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer>.
22. Ng K. M., Adam N. M., Inayatullah O., Kadir A. (2014) Assessment of Solar Radiation on Diversely Oriented Surfaces and Optimum Tilts for Solar Absorbers in Malaysian Tropical Latitude. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 5 (1). <https://doi.org/10.1007/s40095-014-0075-7>.
23. Kendirli B. (2006) Structural Analysis of Greenhouses: A Case Study in Turkey. *Building and Environment*, 41, 864–871. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.013>.
24. Hailu G., Fung A.S. (2019) Optimum Tilt Angle and Orientation of Photovoltaic Thermal System for Application in Greater Toronto Area, Canada. *Sustainability*, 2019, 11 (22), 6443. <https://doi.org/10.3390/su11226443>.
25. Gheyraati M., Akram A., Ghasemi-Mobtaker H. (2022) Optimum Orientation of the Multi-Span Greenhouse for Maximum Capture of Solar Energy in Central Region of Iran. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 9 (3), 65–74. <https://doi.org/10.30501/jree.2022.305780.1259>.
26. Gairaa K., Khellaf A., Chellali F., Benkacali S., Bakelli Y., Bezari S. (2015) Maximisation and Optimisation of the Total Solar Radiation Reaching the Solar Collector Surfaces. Dincer I., Colpan C., Kizilkan O., Ezan M. (eds.) *Progress in Clean Energy. Vol. 2*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17031-2_57.
27. Duffie J. A., Beckman W. A. (2013) *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Son, New Jersey. 910 <https://doi.org/10.1002/9781118671603>.
28. Tabet I., Touafek K., Bellel N., Bouarroudj N., Khelifa A., Adouane M. (2014). Optimization of Angle of Inclination of the Hybrid Photovoltaic-Thermal Solar Collector Using Particle Swarm Optimization Algorithm. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 6 (5), 053116. <https://doi.org/10.1063/1.4896956>.
29. Jafarkazemi F., Saadabadi A. S. (2013) Optimum Tilt Angle and Orientation of Solar Surfaces in Abu Dhabi, UAE. *Renewable Energy*, 2013, 56, 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.10.036>.
30. Singh R. D., Tiwari G. N. (2010) Energy Conservation in the Greenhouse System: A Steady State Analysis. *Energy*, 2010, 35 (6), 2367–2373. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.003>.
31. Mobtaker H. G., Ajabshirchi Y., Ranjbar S. F., Matloobi M. (2016) Solar Energy Conservation in Greenhouse: Thermal Analysis and Experimental Validation. *Renewable Energy*, 96 (A), 509–519. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.079>.
32. Mellalou A., Riad W., Mouaky A., Bacaoui A., Outzourhit A. (2021) Optimum Design and Orientation of a Greenhouse for Seasonal Winter Drying in Morocco under Constant Volume Constraint. *Solar Energy*, 230, 321–332. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.050>.
33. El-Maghlany W. M., Teamah M. A., Tanaka H. (2015) Optimum Design and Orientation of the Greenhouses for Maximum Capture of Solar Energy in North Tropical Region. *Energy Conversion and Management*, 105, 1096–1104. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.066>.
34. Mahjoob Karambasi B., Ghodrati M., Naghashzadegan M., Ghorbani G. Optimum Design of a Greenhouse for Efficient Use of Solar Radiation Using a Multi-objective Genetic Algorithm. *Energy Efficiency*, 15 (8), 66. <https://doi.org/10.1007/s12053-022-10073-6>.