

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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 68, № 6
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

22 декабря – День энергетика

СОДЕРЖАНИЕ

105 лет лидеру технического образования в Беларуси (Маляревич А. М.) 481

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Esman A. K., Zykov G. L., Kuleshov V. K. Simulation of Electromagnetic Characteristics of a Terahertz Receiver

(Есман А. К., Зыков Г. Л., Кулешов В. К. Моделирование электромагнитных характеристик приемника терагерцового излучения) 483

Гречихин Л. И. Теория биполярного транзистора с учетом строения твердого тела и наличия отрицательных ионов. Часть 1. Строение полупроводникового твердого тела, легированного мышьяком и индием 491

Gade S., Sangole M., Agrawal R., Patil D., Jha R., Risodkar Y., Kumar A. Distributed Generation Planning Using the R Method

(Гадэ С., Санголе М., Агравал Р., Патиль Д., Джха Р., Рисодкар Й., Кумар А. Планирование распределенной генерации с использованием метода R) 504

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Рыжова Т. В., Тумаркина Д. Д., Бухаров Д. Н., Самышкин В. Д., Лелекова А. Ф., Аракелян М. М., Кучерик А. О., Аракелян С. М. Технологии улучшения эксплуатационных характеристик динамических газожидкостных теплоэнергетических установок при управляемом лазерном индуцировании регулируемых локальных конфигураций топологических микро- и наноструктур на внутренней металлической поверхности рабочих камер. Часть 1 517

Пехота Е. А., Романиук В. Н. Анализ экспериментальных данных применения дегазационно-вентиляционного устройства при дегазации газгольдеров, содержащих низконапорный газ пропан 536

Пенджиев А. М., Мамедов Б. М. Залив Кара-Богаз-Гол как «солнечный пруд» и его энергетические характеристики 551

Перечень статей, опубликованных в журнале «Энергетика» в 2025 г.

I. Тематический указатель 565
II. Именной указатель 567

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. ЖУКОВСКИ (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
В. В. ИВАШЕЧКИН (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
А. С. КАЛИНИЧЕНКО (Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь),
А. КОННОВ (Университет Лунда, Швеция),
Х. МАХКАМОВ (Университет Нортумбрии, Великобритания),
А. А. МИХАЛЕВИЧ (Национальная академия наук Беларусь, 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 Беларусь, 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 28.11.2025. Формат бумаги 60×84^{1/8}. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. 8,74. Тираж экз.
Дата выхода в свет . 2025. Заказ .

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

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

© Белорусский национальный технический университет, 2025

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

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 68, No 6
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

22nd December – Day of Power Engineer

CONTENTS

105th Anniversary to the Leader of Technical Education in Belarus (A. M. Maliarevich)	481
---	------------

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

Esman A. K., Zykov G. L., Kuleshov V. K. Simulation of Electromagnetic Characteristics of a Terahertz Receiver	483
Gretchikhin L. I. Theory of the Bipolar Transistor, Taking into Account the Structure of a Solid and the Presence of Negative Ions. Part 1. Structure of a Semiconductor Solid Doped with Arsenic and Indium	491
Gade S., Sangole M., Agrawal R., Patil D., Jha R., Risodkar Y., Kumar A. Distributed Generation Planning Using the R Method.	504

HEAT POWER ENGINEERING

Ryzhova T. V., Tumarkina D. D., Bukharov D. N., Samishkin V. D., Leleko-va A. F., Arakelian M. M., Kucherik A. O., Arakelyan S. M. Technologies for Improving the Operational Characteristics of Dynamic Gas-Liquid Thermal Power Plants with Controlled Laser Induction of Adjustable Local Configurations of Topological Micro-and Nanostructures on the Internal Metal Surface of Working Chambers. Part 1	517
--	-----

Pekhota E. A., Romanuk V. N. Analysis of Experimental Data on the Use of a Degassing and Ventilation Device for Degassing Gas Holders Containing Low-Pressure Propane Gas	521
--	-----

Penjyiev A. M., Mamedov B. M. Kara-Bogaz-Gol Bay as a “Solar Pond” and Its Energy Characteristics	551
--	-----

List of Papers Published in “Energetika” Journal, 2025

I. Thematic index	565
II. Name index	567

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 28.11.2025. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 11,5.
An edition of copies. Date of publishing 2025. Order list .

ADDRESS

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

Printed in BNTU. License LP 38200000006896 from 03.03.2014.
220013, Minsk, 65, Nezavisimosty Ave.

© Belarusian National Technical University, 2025

105 лет

ЛИДЕРУ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ В БЕЛАРУСИ

Международный научно-технический журнал «Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ» издается с января 1958 г. Основной задачей журнала было определено создание публикационной площадки, на которой ученые и специалисты различных организаций и высших учебных заведений, работающие в области энергетики, могли бы обменяться результатами последних исследований, взглядами и проблемами, связанными с повышением эффективности функционирования энергетической отрасли.

Согласно Соглашению глав правительств от 14 февраля 1992 г. о координации межгосударственных отношений в области электроэнергетики Содружества Независимых Государств, 25 февраля 1992 г. состоялось 1-е заседание Электроэнергетического совета СНГ. На этом заседании было признано целесообразным в интересах развития энергетики СНГ и повышения уровня подготовки инженерных, педагогических и научных кадров учредить научно-технический и производственный журнал с его нынешним названием «Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ» с редакционной коллегией в г. Минске (издатель – Белорусская государственная политехническая академия). 8 мая 1992 г. издание было зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь. Учредителями стали Электроэнергетический совет СНГ, Министерство образования Республики Беларусь, Комитет по высшей школе Министерства науки, высшей школы и технической политики Российской Федерации.

В настоящее время (с 19 марта 2024 г.) учредителем и издателем журнала «Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ» является Белорусский национальный технический университет.

Журнал издается в печатном виде и распространяется через отделения «Белпочты» подписчикам на территории Республики Беларусь, Российской Федерации и других стран СНГ. Кроме того, содержание номеров журнала размещено на сайте БНТУ, а тексты статей доступны через репозиторий Научной библиотеки университета.

Заметным достижением и признанием значимости журнала со стороны международного научного сообщества было включение его

в 2017 г. в базу данных Scopus. По итогам ранжирования научных журналов в 2024 г. «Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ» занимает 44-е место из 77 профильных журналов мира с рейтингом 1,6 цитирования. Этот показатель цитирований постепенно растет в течение последних пяти лет (2020–2024 гг.).

В разное время главными редакторами журнала «Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ» были известные ученые: член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси М. И. Стрелюк, академик Национальной академии наук Беларуси Б. М. Хрусталев, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси Ф. А. Романюк.

Период с 2020 г. до настоящего момента отмечен расширением географии авторов, которые публикуются в журнале. Помимо ученых из европейских стран и Российской Федерации в последние годы активно печатаются научные статьи авторов из КНР, Казахстана, Узбекистана, Вьетнама, Индии. Это нашло отражение и в составе редакционной коллегии журнала.

Среди организаций, авторы из которых представляют на страницах журнала результаты своих исследований, – кроме БНТУ, это РУП «Белэнергосетьпроект», Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт энергетики, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Научно-технологический институт энергетики и окружающей среды Вьетнамской академии наук и технологий, Ереванский государственный университет, Казанский государственный энергетический университет, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Торайгыров университет (Казахстан), Республиканский НПУП «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий» НАН Беларуси, ЗАО «Научно-исследовательский институт энергетики» (Армения), Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, Алматинский технологический университет, Каршинский инженерно-экономический институт (Узбекистан) и многие другие.

Сегодня, отмечая свой 105-летний юбилей, Белорусский национальный технический университет занимает лидирующее положение среди вузов страны и по праву гордится своими достижениями.

Редакция журнала «Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ» поздравляет сотрудников университета с Юбилеем!

С уважением, главный редактор
доктор физико-математических наук,
профессор, член-корреспондент НАН Беларуси
А. М. Маляревич

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-483-490>

UDC 621.396; 681.7

Simulation of Electromagnetic Characteristics of a Terahertz Receiver

A. K. Esman¹⁾, G. L. Zykov¹⁾, V. K. Kuleshov¹⁾

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

Abstract. Electromagnetic radiation of the terahertz range (THz) is used in various fields of science and technology: medical diagnostics, security and control, sensor and communication technologies, scientific research, etc. Computer simulation in the development and research of THz receivers significantly reduces costs and time-to-market by replacing expensive experiments. Advanced software suites, like HFSS, facilitate the accurate modeling of intricate three-dimensional configurations and the analysis of component electrodynamic performance. This study leveraged HFSS to simulate the performance of a THz receiver across the 0.4–1.4 THz band. The accuracy of the simulations relies on the fidelity of the model, encompassing geometric details, material properties, and chosen simulation parameters. This paper proposes a three-dimensional model of an original selective compact receiver of terahertz electromagnetic radiation (with a conversion efficiency of ~97 %) for two resonance frequencies, consisting of a sensor based on two open apodized periodic microcavity structures with a fill factor changing according to a linear law, a matching element in the form of an asymmetric irregular triangular strip line, and a detecting diode. The design offers key advantages including high conversion efficiency, suitability for matrix architectures, high selectivity to registered radiation, and the potential for simple readout methods, making it an attractive approach for THz sensing, an important tool across various scientific and practical applications.

Keywords: sensor, detecting diode, terahertz radiation, 3D model, resonance frequency, HFSS, conversion efficiency, reflection losses, directivity

For citation: Esman A. K., Zykov G. L., Kuleshov V. K. (2025) Simulation of Electromagnetic Characteristics of a Terahertz Receiver // *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (6), 483–490. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-483-490>

Моделирование электромагнитных характеристик приемника терагерцового излучения

А. К. Есман¹⁾, Г. Л. Зыков¹⁾, В. К. Кулешов¹⁾

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

Реферат. Электромагнитное излучение терагерцового диапазона (ТГц) находит применение в различных областях науки и технологий (медицинская диагностика, безопасность и контроль, сенсорные технологии, коммуникационные технологии, научные исследования и т.д.). Компьютерное моделирование в разработке и исследовании ТГц-приемников значительно сокращает затраты и время вывода продукта на рынок, заменяя дорогостоящие эксперименты. Современные программные комплексы, такие как HFSS, позволяют точно моделировать сложные трехмерные конфигурации и анализировать электродинамические

Адрес для переписки

Зыков Григорий Люцианович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 331-00-50
zykov@bntu.by

Address for correspondence

Zykov Gregory L.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 331-00-50
zykov@bntu.by

характеристики компонентов. В рамках исследования параметров ТГц-приемника в диапазоне 0.4–1.4 ТГц использовалось моделирование в HFSS, где точность результатов зависит от корректности модели, включая детализацию геометрии, свойства материалов и параметры симуляции. В данной работе предложена трехмерная модель оригинального селективного компактного приемника электромагнитного излучения терагерцового диапазона длин волн (с эффективностью преобразования ~97 %) для двух резонансных частот, состоящего из чувствительного элемента, выполненного на основе двух открытых аподизированных периодических микрорезонаторных структур с коэффициентом заполнения, изменяющимся по линейному закону, согласующего элемента в виде несимметричной нерегулярной полосковой линии треугольной формы и детектирующего диода. Конструкция обладает ключевыми преимуществами, включая высокую эффективность преобразования, пригодность для матричной архитектуры, высокую селективность к регистрируемому излучению и возможность простых методов считывания, что делает ее привлекательным подходом для терагерцового зондирования – важного инструмента для различных научных и практических приложений.

Ключевые слова: чувствительный элемент, детектирующий диод, терагерцовое излучение, трехмерная модель, резонансная частота, HFSS, эффективность преобразования, потери на отражение, коэффициент направленного действия

Для цитирования: Есман, А. К. Моделирование электромагнитных характеристик приемника терагерцового излучения / А. К. Есман, Г. Л. Зыков, В. К. Кулешов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 6. С. 483–490. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-483-490>

Introduction

The terahertz (THz) range of electromagnetic radiation, with frequencies from 0.1 THz to 10 THz, corresponds to a wavelength range from 3 mm to 30 μ m, situated between millimeter waves and infrared waves. As a result of the rapid development of ultrafast electronics, laser and semiconductor technology, terahertz sensors have found widespread application in various fields of science and technology [1]. Some of these include: non-invasive tissue imaging; baggage and clothing scanning for concealed objects; chemical detection; high-speed wireless communication; the study of molecular dynamics, material properties and interactions at the nanoscale.

Creating a compact and reliable receiver for THz radiation is one of the challenging tasks in modern applied physics [2]. This is because both radio-physical methods (from the long wavelength side) and optical methods (from the short wavelength side) perform poorly in this spectral region [3].

The aim of this article is to develop a simulation model of a selective compact receiver for terahertz electromagnetic radiation, and to calculate and evaluate its main electromagnetic characteristics.

THz receiver design and its operational algorithm

This article discusses a selective THz receiver based on two apodized periodic microcavity structures with a filling factor that varies linearly, coupled through matching elements to a detecting diode [4].

One of the important factors affecting the efficiency of converting electromagnetic wave energy in the THz range into an electrical information signal by the proposed structure is the optimal matching of the sensor with the surrounding space and the detecting diode.

Structurally, the THz receiver consists of sensors 4, located on a substrate 1 and implemented as two apodized metal diffraction gratings (with a linearly varying filling factor), coupled through matching elements 5, which are asymmetrical irregular strip lines of triangular shape, with a detecting diode 6. In the substrate 1, there is an air cavity 8 under the detecting diode 6, and rectangular cutouts 7 under the sensors 4. At the ends of the diagonal of the substrate 1, contact pads 3 are symmetrically located, electrically connected by L-shaped output lines 2 to the bases of the matching elements 5, the apex angle of which is chosen to be 140° (Fig. 1).

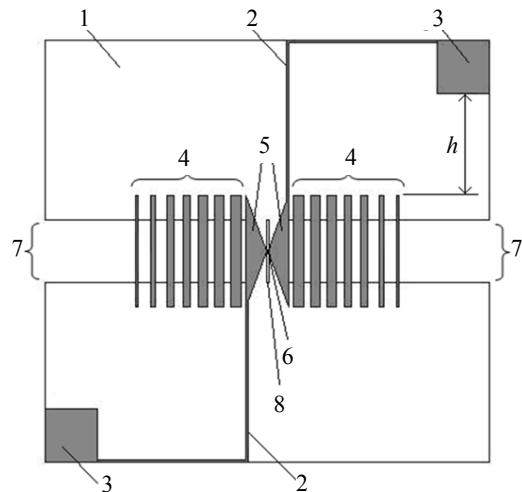


Fig. 1. Structure of the terahertz receiver: 1 – substrate; 2 – output lines; 3 – contact pads; 4 – sensors; 5 – matching elements; 6 – detecting diode; 7 – rectangular cutouts; 8 – air cavity

The device operates as follows. Electromagnetic radiation of the THz wavelength range from the surrounding space is almost completely absorbed by the sensors 4 due to their optimal impedance matching with the surrounding environment. This radiation is fed to the detecting diode 6 through the matching elements 5, which provide optimal matching between the diode and the sensors 4. Thus, high-frequency electrical currents, whose frequency corresponds to the received wavelength range of terahertz radiation, are fed to the detecting diode 6. The electrical information signal from the detecting diode 6, through the matching elements 5 and output lines 2, is fed to the contact pads 3 (the output of the device).

The proposed sensor enables optimal impedance matching between the receiver and the surrounding environment. Furthermore, the varying impedance of the matching element 5 along its length ensures efficient signal transfer to the load (detecting diode 6). The selected locations of the contact pads 3, the configuration of the output lines 2 and the specified optimal distance between the horizontal sections of the output lines 2 also reduce reflection losses in the considered receiver.

A diode 6 with a reduced effective Schottky barrier height was used for highly efficient detection of THz frequency currents corresponding to the range of converted wavelengths. This diode is one of the primary nonlinear elements widely employed today for converting THz radiation. It has virtually no competitors in the electromagnetic wave range under consideration.

Computer simulation and its results

Application of computer simulation in the research and design of THz receivers can largely replace expensive experiments, which leads to a significant reduction in product release times and lower development costs [5]. The modern development of computer technology, the active improvement of known methods and the development of new methods for the analysis and synthesis of receiving devices open up opportunities for quick and high-quality problem solving in this area [6, 7]. Currently, there are a number of universal and sufficiently powerful software packages such as FEKO, CST MicrowaveStudio, Comsol Multiphysics [8–10], MMANA, HFSS, etc. for modeling the electrodynamic characteristics of various elements and devices. A computer experiment to study the main parameters and characteristics of the proposed THz electromagnetic radiation receiver in the frequency range of 0.4...1.4 THz (Fig. 1) was carried out using the modern powerful software package HFSS, which provides modeling of complex three-dimensional configurations of arbitrary shape. The accuracy of the results obtained is determined by the adequacy of the constructed model. This refers to the correct execution of the drawing, the accurate specification of the materials of the analyzed structure, the optimal decomposition of space into decomposition elements and the choice of simulation mode.

The numerical calculation of the THz receiver was carried out within a limited area of space in the studied frequency range (Fig. 2).

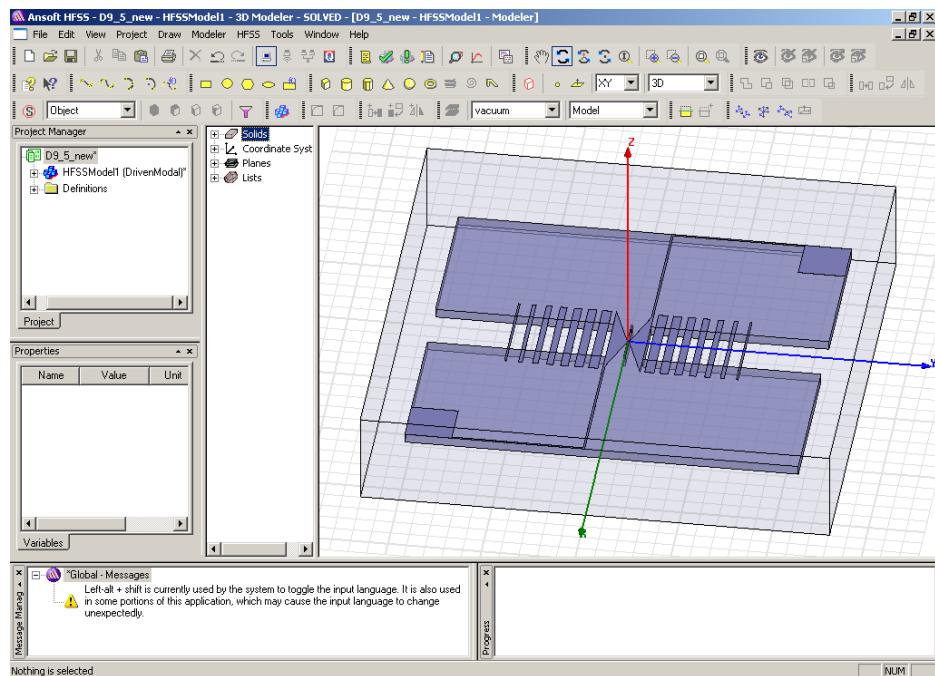


Fig. 2. Screenshot of the developed model of the THz receiver in the HFSS software environment

The period of the apodized grating of the sensor 4 was $15 \mu\text{m}$. Gold with a thickness of 80 nm was chosen as the conductive material, and the dielectric of the substrate 1 had a dielectric constant of 2.17, a loss tangent of $9 \cdot 10^{-4}$ and a thickness of $10 \mu\text{m}$. The sensor geometric dimensions were $105 \times 105 \mu\text{m}$,

and the geometric dimensions of the contact pads 3 were $50 \times 50 \mu\text{m}$, with a total receiver length of $250 \mu\text{m}$. The distance h between the contact pads 3 and the sensor 4 varied from $100 \mu\text{m}$ to $0 \mu\text{m}$. The equivalent circuit of the detecting diode 6 was chosen as a parallel connection of an active resistance R , which varied in the range from 20Ω to 170Ω , and an electrical capacitance C of 20 fF .

The HFSS postprocessor provides animation for any field and its visualization in the form of vectors, processes static and animated drawings on any surface, including object section surfaces, three-dimensional object surfaces and three-dimensional spatial surfaces. The postprocessor also performs data processing after field calculation. With its help, it is possible to calculate characteristics such as scattering power, absorbed energy, quality factor, S -parameters and related characteristics.

Fig. 3 shows the calculated main frequency characteristics of the considered receiver at the extreme values of the specified range $h = 100 \mu\text{m}$ and $0 \mu\text{m}$: reflection losses S_{11} (a), standing wave ratio (SWR) (b) and conversion efficiency (c).

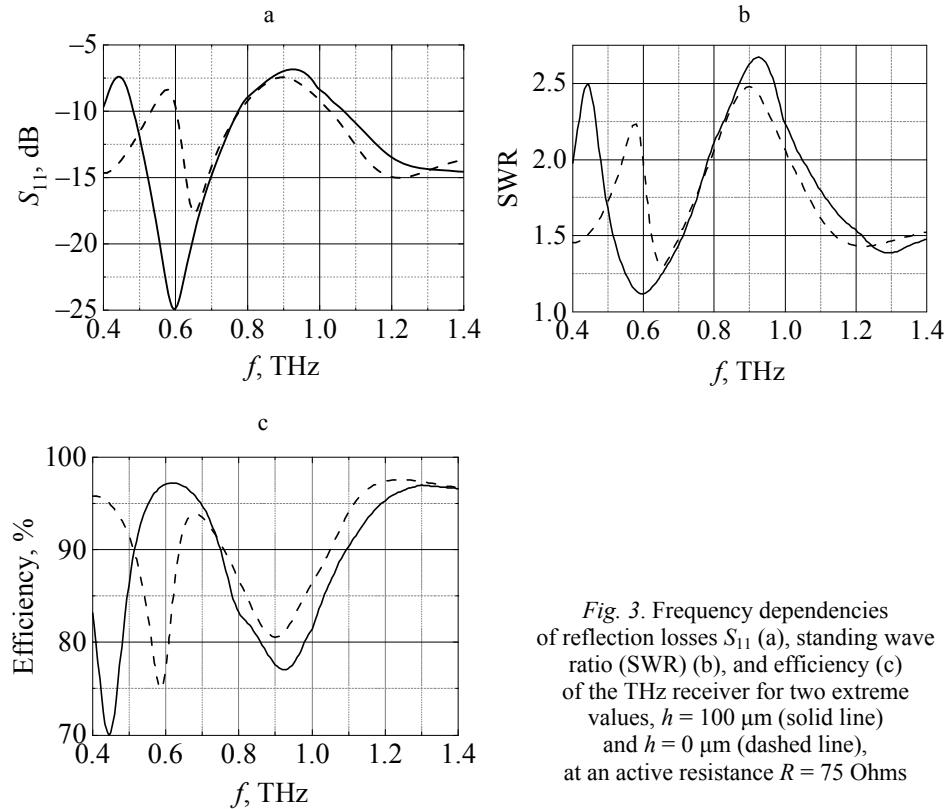


Fig. 3. Frequency dependencies of reflection losses S_{11} (a), standing wave ratio (SWR) (b), and efficiency (c) of the THz receiver for two extreme values, $h = 100 \mu\text{m}$ (solid line) and $h = 0 \mu\text{m}$ (dashed line), at an active resistance $R = 75 \Omega$

Fig. 4 Shows the dependencies of the directivity factor (DF) of the THz receiver at $h = 100 \mu\text{m}$ and $0 \mu\text{m}$ for resonance frequencies on the elevation angle θ .

The calculated losses S_{11} of the received radiation due to reflection, depending on the change in the value of the active resistance R and the specified value of the capacitance C at a fixed $h = 100 \mu\text{m}$ at resonance frequencies of 0.6 and 1.3 THz , are shown in Fig. 5.

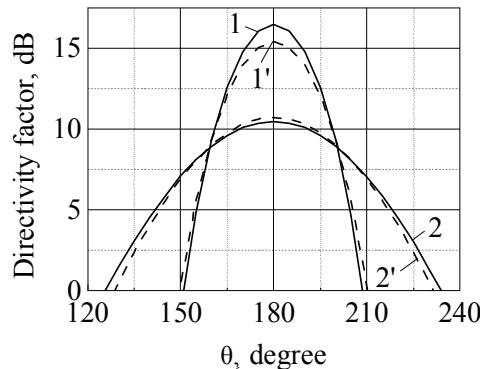


Fig. 4. Dependence of the directivity factors of the terahertz receiver on the elevation angle θ at an azimuthal angle $\varphi = 90$ degrees at resonance frequencies of 1.3 (1), 1.25 (1'), 0.65 (2') and 0.6 (2) at $h = 100 \mu\text{m}$ (solid line) and 0 μm (dashed line)

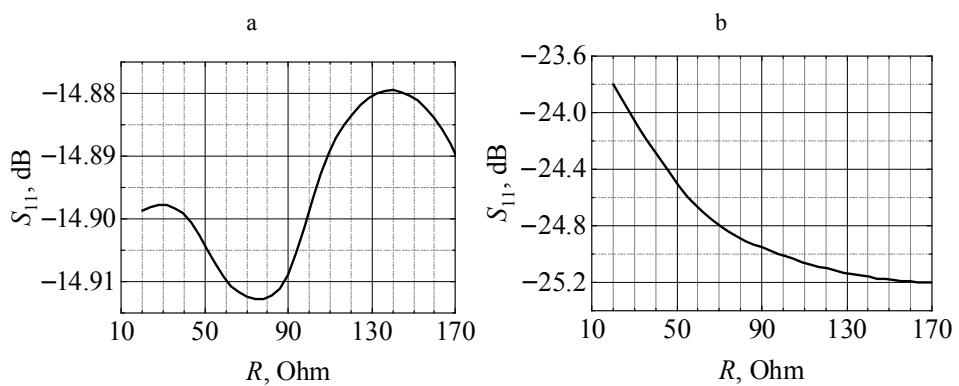


Fig. 5. Dependencies of reflection losses S_{11} of the THz receiver on the resistance R of the detecting diode at resonance frequencies of 0.6 (a) and 1.3 (b) THz at $h = 100 \mu\text{m}$

The use of the HFSS postprocessor at each point in space made it possible to calculate the magnitude and phase of the E and H vectors of the electromagnetic field and to analyze the field in all possible sections, as well as animate the field distributions by changing the phase of the excitation generator, which creates the impression of the field passing through the structure. The electric field distribution for one of the sections of the THz receiver is shown in Fig. 6.

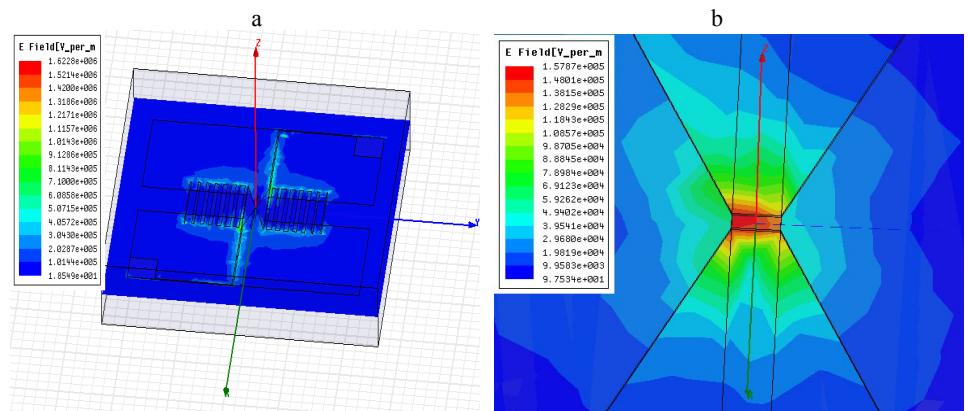


Fig. 6. Electric field distribution in the plane of the upper surface of the substrate (a) and an enlarged fragment of this distribution in the central part of the receiver (at the location of the diode) (b)

Fig. 7 shows the dependencies of the resonance frequencies and reflection losses S_{11} of the THz receiver on the distance h between the output lines and the sensors for an active resistance of the detecting diode of 75 Ohms.

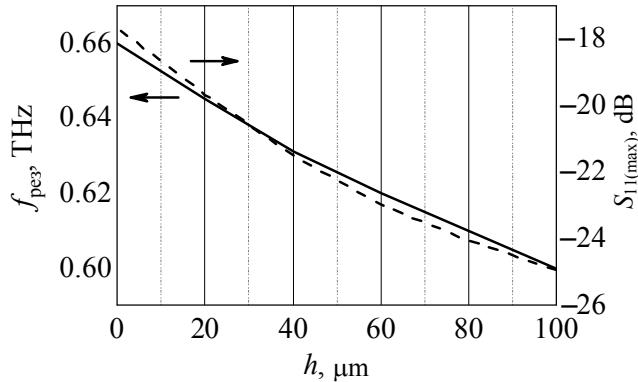


Fig. 7. Dependencies of the resonance frequency (solid line) and reflection losses S_{11} (dashed line) of the THz receiver on the distance between the output lines for an active resistance of the detecting diode of 75 Ohms

The maximum conversion efficiency at frequencies 0.6 THz (at $h = 100 \mu\text{m}$) and 1.25 THz (at $h = 0 \mu\text{m}$) is 97.2 and 97.6 %, respectively. Optimal values of reflection losses and standing wave ratio are observed at a frequency of 0.6 THz (at $h = 100 \mu\text{m}$) and are equal to -24.93 dB and 1.12, respectively.

The results presented in Fig. 5b indicate that the optimal resistance for the detecting diode is $R = 75 \text{ Ohms}$ at the resonance frequency of 0.6 THz. Fig. 7 shows that as the contact pads 3 approach the sensor 4, the reflection losses S_{11} increase along with an increase in the resonance frequency.

The maximum directivity factor at frequencies 0.6 THz and 1.3 THz is 10.48 dB and 16.5 dB, respectively, at $h = 100 \mu\text{m}$, and at frequencies 0.65 THz and 1.25 THz, it is 10.74 and 15.42 dB, respectively, at $h = 0 \mu\text{m}$.

The simulation shows that the proposed THz receiver structure has a high conversion efficiency of up to 97.6 % at two resonance frequencies in the considered range: 0.6 THz (at $h = 100 \mu\text{m}$) and 1.25 THz (at $h = 0 \mu\text{m}$), respectively. The directivity factor at frequencies of 0.6 THz and 1.3 THz is 10.48 and 16.5 dB, respectively, at $h = 100 \mu\text{m}$, and at frequencies of 0.65 THz and 1.25 THz, it is 10.74 and 15.42 dB, respectively, at $h = 0 \mu\text{m}$.

CONCLUSION

The original design of the receiving part makes the open microcavity structure based on apodized gratings attractive for building integrated high-efficiency compact THz receivers that have a number of distinctive properties:

- ✓ high conversion efficiency;
- ✓ possibility of implementing a matrix design;

- ✓ high selectivity of the registered radiation;
- ✓ possibility of implementing a simple readout method.

Terahertz radiation sensors are an important modern tool in various scientific and practical fields.

REFERENCES

1. Makhlof S., Cojocari O., Hofmann M., Nagatsuma T., Preu S., Weimann N., Hübers H.-W., Stöhr A. (2023) Terahertz Sources and Receivers: Form the Past to the Future. *IEEE Journal of Microwaves*, 3 (3), 894–912. <https://doi.org/10.1109/jmw.2023.3282875>.
2. Peng K., Morgan N.P., Wagner F.M., Siday Th., Xia Ch. Q., Dede D., Boureau V., Piazza V., Fontcuberta I Morral A., Johnston M.B. (2024) Direct and Integrating Sampling in Terahertz Receivers from Wafer-Scalable InAs Nanowires. *Nature Communications*, 15, 103. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44345-1>.
3. Rogalin V. E., Kaplunov I. A., Kropotov G. I. (2018) Optical Materials for the THz Range. *Ultraviolet, Infrared, and Terahertz Optics*, 125, 1053–1064. <https://doi.org/10.1134/s0030400x18120172>.
4. Esman A. K., Kuleshov V. K., Zykov G. L. (2011) *Terahertz Detection Antenna*. Patent of the Republic of Belarus No 7220 (in Russian).
5. Wang Zh. (2023) A 285 GHz Tripler Using Planar Schottky Diode. *Optics and Photonics Journal*, 13 (8), 209–216. <https://doi.org/10.4236/opj.2023.138019>.
6. Esman A. K., Potachits V. A., Zykov G. L., Kuleshov V. K. (2015) Detector for Submillimeter Wavelength Range on the Basis of the Man-Made Materials. *Pribory i Metody Izmereniy = Devices and Methods of Measurements*, 1 (10), 5–9 (in Russian).
7. Esman A. K., Kuleshov V. K., Zykov G. L., Zalesski V. B. (2011) Infrared Detector on the Basis of the Schottky Junction with the Resonance Nano- and Microstructures. *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika = Journal of Nano and Microsystem Technique*, 3 (167), 44–46 (in Russian).
8. Esman A. K., Zykov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K. (2020) Simulation of Thin-Film Solar Cells with a CuInSe₂ Chalcopyrite Structure. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (1), 5–13. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-5-13>.
9. Esman A. K., Zykov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K. (2021) Simulation of Photovoltaic Thermoelectric Battery Characteristics. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (3), 250–258. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-250-258>.
10. Esman A. K., Zykov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K. (2024) Simulation of Vertical Thin-Film Solar Battery under Exposure of Concentrated Solar Radiation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (5), 381–392. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-381-392> (in Russian).

Received: 2 June 2025

Accepted: 8 August 2025

Published online: 28 November 2025

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-491-503>

УДК 53(075.3)

Теория биполярного транзистора с учетом строения твердого тела и наличия отрицательных ионов

Часть 1

Строение полупроводникового твердого тела, легированного мышьяком и индием

Л. И. Гречихин¹⁾

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

Реферат. Биполярные транзисторы в электронике являются основной элементной базой. Развитие этой базы осуществлялось преимущественно опытным путем. Для обоснования работы транзистора применялись качественные представления в виде двойного $p-n$ перехода вида $p-n-p$ или $n-p-n$ проводимости. При таком обосновании многие свойства работающего полупроводникового транзистора оставались за пределами их четкого представления. Поэтому в настоящей работе рассмотрено устройство биполярного транзистора с учетом строения твердого тела полупроводниковой основы и взаимодействия с поверхностью твердого тела атомов в виде отрицательных ионов. На основании анализа данных, полученных туннельным микроскопом, поверхность твердого тела покрыта мономолекулярной пленкой, а сам кристалл полупроводниковой основы сформирован положительно заряженными атомами и находится под мономолекулярной пленкой. Молекулярная пленка формируется поверхностными кластерами, а кристалл – объемными кластерами. Взаимодействие поверхностных кластеров создает пористую структуру молекулярной пленки. Через эти поры виден кристалл твердого тела. Примеси в виде отдельных молекул на поверхность кристалла проникают через отверстия в молекулярной пленке, сформированные в виде столбообразных пустот. На поверхности кристалла молекулы примеси вследствие обменного взаимодействия диссоциируют на отдельные атомы, которые в свою очередь также вследствие обменного взаимодействия превращаются в отрицательные ионы. Конкретно рассмотрено легирование поверхности полупроводникового кристалла германия или кремния молекулами мышьяка и индия. После распада молекул на атомы в столбообразных пустотах происходит их превращение в отрицательные ионы, которые блокируют проникновение других молекул в эти пустоты.

Ключевые слова: биполярный транзистор, отрицательный ион, мономолекулярный слой, кристалл, двойной электрический слой

Для цитирования: Гречихин, Л. И. Теория биполярного транзистора с учетом строения твердого тела и наличия отрицательных ионов. Ч. 1: Строение полупроводникового твердого тела, легированного мышьяком и индием / Л. И. Гречихин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 6. С. 491–503. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-491-503>

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, Uborevich str.,
220096, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 378-46-44
gretchihin@yandex.ru

Theory of the Bipolar Transistor, Taking into Account the Structure of a Solid and the Presence of Negative Ions

Part 1

Structure of a Semiconductor Solid Doped with Arsenic and Indium

L. I. Gretchikhin¹⁾

¹⁾Educational Institution “Belarusian State Academy of Communication” (Minsk, Republic of Belarus),

Abstract. Bipolar transistors are the main element base in electronics. The development of this base was carried out mainly through experimentation. To justify the operation of the transistor, qualitative representations were used in the form of a double $p-n$ junction of the $p-n-p$ or $n-p-n$ conductivity type. With this justification, many properties of a working semiconductor transistor remained beyond their clear understanding. Therefore, in this paper, the design of a bipolar transistor is considered, taking into account the structure of the solid body of the semiconductor base and the interaction of atoms in the form of negative ions with the surface of the solid body. Based on the analysis of data obtained by a tunneling microscope, the surface of the solid is covered with a monomolecular film, and the crystal of the semiconductor base itself is formed by positively charged atoms and is located under the monomolecular film. The molecular film is formed by surface clusters, and the crystal is formed by volume clusters. The interaction of surface clusters creates a porous structure of the molecular film. Through these pores the crystal of the solid body is visible. Impurities in the form of individual molecules penetrate the surface of the crystal through holes in the molecular film, formed in the form of columnar voids. On the surface of the crystal, impurity molecules, as a result of exchange interaction, dissociate into individual atoms, which in turn, also as a result of exchange interaction, are converted into negative ions. The doping of the surface of a semiconductor crystal of germanium or silicon with arsenic and indium molecules is specifically considered. After the molecules disintegrate into atoms in the columnar voids, they are converted into negative ions, which block the penetration of other molecules into these voids.

Keywords: bipolar transistor, negative ion, monomolecular layer, crystal, electrical double layer

For citation: Gretchikhin, L. I. (2025) Theory of the Bipolar Transistor, Taking into Account the Structure of a Solid and the Presence of Negative Ions. Part 1: Structure of a Semiconductor Solid Doped with Arsenic and Indium. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (6), 491–503. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-491-503> (in Russian)

Введение

Создание транзистора в середине XX в. отмечено Нобелевской премией в 1956 г., которая была вручена Джону Бардину, Уолтеру Брэттейну и Уильяму Шокли. Это событие послужило основой быстрого развития электронной техники (электроники) и внедрения этой техники практически во все области человеческой деятельности. Такое быстрое развитие электроники происходило преимущественно опытным путем на уровне интуиции. Теоретическое обоснование полученных опытных результатов осуществлялось эмпирически, т. е. путем использования математических формул, позволяющих как-то описать полученные экспериментальные данные в модельном представлении.

Устройство транзистора достаточно простое. Полупроводниковый кристалл германия или кремния легируется примесями. Разработаны три технологии введения примесей: сплавная, диффузионная и эпитаксильная. В настоящее время в основном используется диффузионная технология. Во всех технологиях введенные примеси являются донорами или акцепторами свободных электронов. Полагали, что донорами являются атомы мышьяка, фосфора или сурьмы. Эти примеси при введении в полупроводник отдают свой один из валентных трех электронов, а сами остаются в виде положительно заряженной «дырки». В этом случае полупроводниковый материал получил название *n*-типа, так как решили, что электрический ток в основном поддерживают электроны, а не положительно заряженные «дырки» [1–3].

При легировании полупроводникового материала трехвалентными атомами индия (In) или атомами бора, алюминия, галлия эти атомы отдают свои три валентных электрона трем соседним атомам. Это создает в ковалентной связи «дырку». Полагали, что наличие дополнительных «дырок» позволяет электронам легко дрейфовать от одной ковалентной связи к другой. Так как «дырки» легко захватывают электроны, то атомы, которые вносят в полупроводнике дополнительные «дырки», являются акцепторами. При обычных условиях количество «дырок» в таком материале значительно превышает количество электронов. Следовательно, «дырки» в электрическом токе в этом случае являются основными носителями электрических зарядов, а электроны – не основными. Так как основные носители «дырки» обладают положительным зарядом, такой материал назвали полупроводником *p*-типа [1–3]. Такое представление о работе *p–n* перехода в транзисторах является чисто качественным. На таких представлениях полностью понять, как работает полупроводниковый транзистор, не представляется возможным.

Для транзисторов разработаны два типа конструкций – биполярные и полевые. По ранее сформированным представлениям в обоих типах транзисторов используются два *p–n* перехода. Формируются оба перехода путем легирования основного полупроводника разными примесями. У катода и анода вводили один тип примеси, а между ними – другой и полагали, что возникают два варианта проводимостей: *n–p–n* или *p–n–p*. При таком обосновании многие явления, возникающие в транзисторе, невозможно предвидеть и, что очень важно, обосновать условия его оптимальной работы. В этой связи необходимо детально выяснить структуру транзистора и то, почему эта структура позволяет регулировать прохождение электрических токов через транзистор.

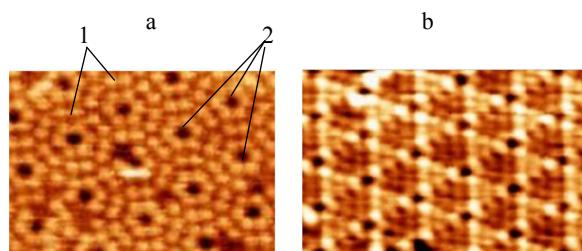
Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- обосновать структуру полупроводниковой основы;

- выяснить, что происходит, когда полупроводниковая основа легируется разными элементами;
- определить энергию связи введенных примесей в полупроводниковую основу.

Основная часть

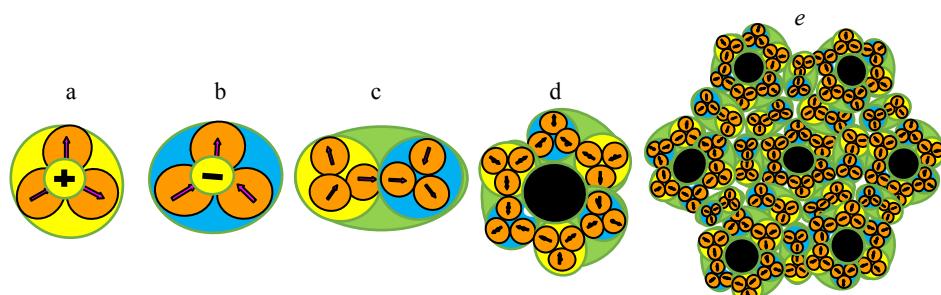
Структура полупроводниковой основы. При производстве транзисторов в качестве полупроводниковой основы применяются в твердом состоянии кремний или германий с поверхностью кристалла в индексах Миллера (111), которая обладает максимальной плотностью атомов на поверхности кристалла, а сама поверхность является идеально плоской. Такая поверхность экспериментально подробно изучена применительно к кремнию туннельным микроскопом [4–7]. Результат приведен на рис. 1.



Rис. 1. Поверхность из трехатомных молекул кремния при подаче напряжения на зонд в туннельном микроскопе +2 В (а) и -2 В (б): 1 – двухпарные трехатомные молекулы; 2 – столбообразные пустоты на поверхности из трех двухпарных молекул

Fig. 1. Surface of triatomic silicon molecules with a probe voltage of +2 V (a) and -2 V (b) applied in a tunneling microscope: 1 – two-pair triatomic molecules; 2 – columnar voids on the surface of three two-pair molecules

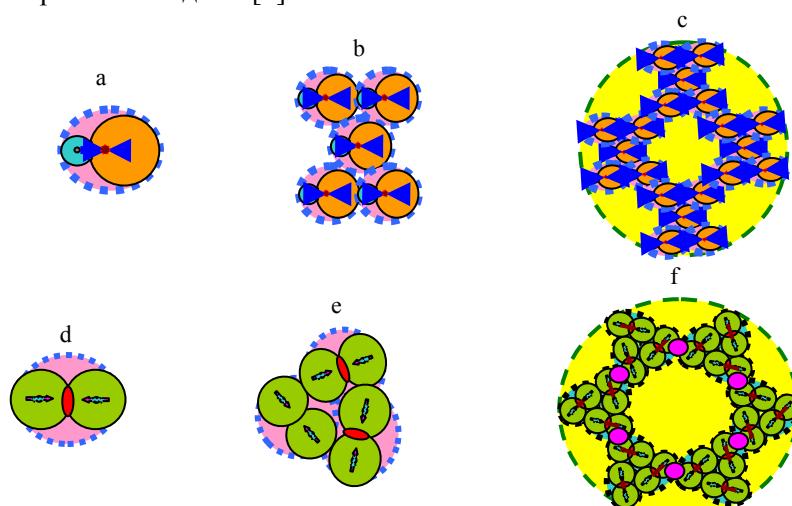
При напряжении +2 и -2 В, подаваемом на зонд микроскопа с высоким пространственным разрешением, можно «видеть» каждую отдельную частицу. Размер отдельных частиц на поверхности кремния соответствует трехатомным молекулам, у которых в центре встроен положительный или отрицательный электрический заряд. Процесс формирования поверхности в твердом полупроводнике из трехатомных молекул происходит в такой последовательности: две молекулы с разным электрическим зарядом в центре соединяются в парные образования. Затем три парные образования создают основной поверхностный кластер. Основные поверхностные кластеры между собой связаны парной структурой. Последовательность формирования поверхности в твердом теле из трехатомных молекул представлена на рис. 2. В центре основного поверхностного кластера возникает столбообразная пустота (черная окружность), которая опирается на кристалл полупроводника. Размер столбообразной пустоты и соответствующих примесей позволяет непосредственно на кристалле германия или кремния внутри столбообразной пустоты разместиться одной трехатомной молекуле или одной двухатомной молекуле вводимых примесей мышьяка и индия.



Ruc. 2. а – трехатомная молекула с положительным зарядом в центре; б – трехатомная молекула с отрицательным зарядом в центре; в – парная конструкция из трехатомных молекул; д – основной поверхностный кластер из трехатомных молекул, в центре которых находится столбовидная пустота; е – элемент поверхности твердого тела из основного кластера, вокруг которого расположены парные образования, объединяющие поверхностные основные кластеры

Fig. 2. a – triatomic molecule with a positive charge at the center;
b – triatomic molecule with a negative charge at the center; c – paired structure
of triatomic molecule, d – main surface cluster of triatomic molecule,
in the center of which there is a columnar voids; e – solid surface element from a primary cluster,
around which paired formations are located, combining surface primary clusters

Процесс образования молекулярных структур из двухатомных молекул при легировании их на полупроводниковую основу показан на рис. 3. При изготовлении транзисторов интерес представляет поверхность, состоящая из одинаковых двухатомных молекул. Экспериментально на туннельном микроскопе были проведены исследования изменения поверхности кремния при легировании индием [6].



Ruc. 3. а – двухатомная молекула из разных атомов; б – промежуточный кластер; в – основной кластер из двухатомных молекул разных атомов; д – двухатомная молекула из одинаковых атомов; е – промежуточный кластер; ф – основной поверхностный кластер из одинаковых атомов

Fig. 3. а – diatomic molecule made up of different atoms;
б – intermediate cluster; в – basic cluster of diatomic molecules of different atoms;
д – diatomic molecule made up of identical; е – intermediate cluster;
ф – basic surface cluster of identical atoms

Результаты легирования полупроводниковой основы поверхности кремния молекулами индия в зависимости от времени легирования показаны на рис. 4 [6].

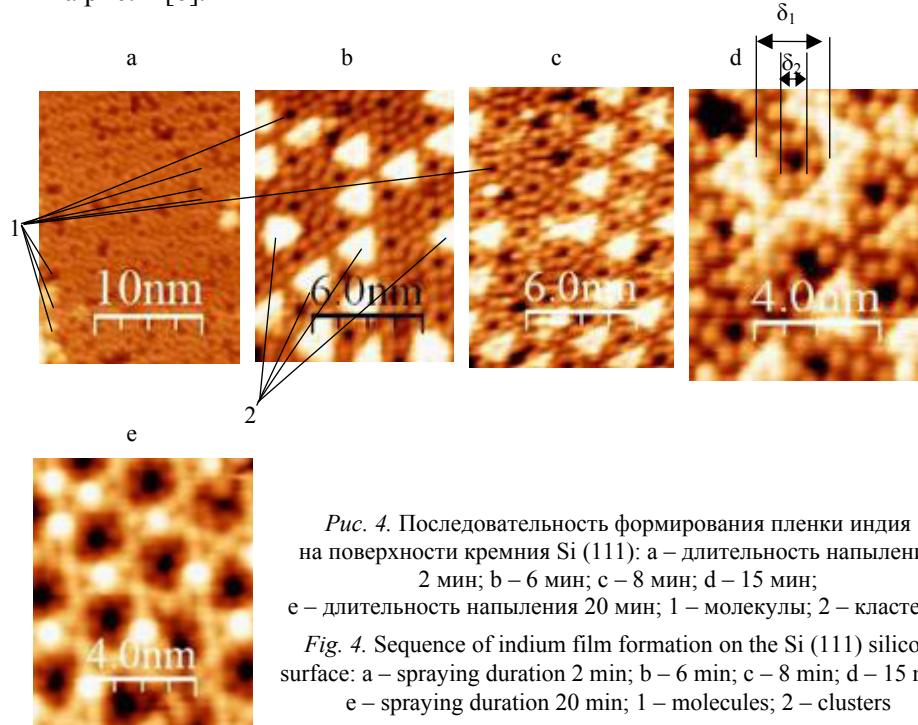


Рис. 4. Последовательность формирования пленки индия на поверхности кремния Si (111): а – длительность напыления 2 мин; б – 6 мин; в – 8 мин; г – 15 мин; е – длительность напыления 20 мин; 1 – молекулы; 2 – кластеры

Fig. 4. Sequence of indium film formation on the Si (111) silicon surface: a – spraying duration 2 min; b – 6 min; c – 8 min; d – 15 min; e – spraying duration 20 min; 1 – molecules; 2 – clusters

Формирование поверхности полупроводниковой основы после легирования. В начальный момент легирования, когда индий был нагрет строго до температуры кипения, преимущественно испарялись молекулы индия (рис. 4а). Поверхность кремния оказалась практически чистой, и достаточно редко видны молекулы индия. Практически все молекулы индия были поглощены столбообразными пустотами и дефектами поверхностного слоя кремния. Некоторые молекулы индия осаждались между молекулами, которые формируют столбообразную пустоту, и не проникали внутрь столбообразной пустоты (рис. 4д). По мере увеличения времени легирования температура жидкого индия несколько уменьшалась, и это приводило к испарению преимущественно основных кластеров индия (треугольники на рис. 4б). В этом случае поток испарения кластеров значительно превосходит поток испарения молекул индия. Это обусловлено тем, что в соответствии с выполненными оценками силы поверхностного натяжения для молекул отличны от нуля, а для кластеров почти равны нулю.

Масса основных кластеров из двухатомных молекул в потоке значительно больше массы отдельных молекул индия. Поэтому в процессе испарения вблизи температуры кипения у жидкой поверхности индия отдельные молекулы и основные поверхностные кластеры образуют «пар», и на полупроводниковую поверхность внутрь столбообразных пустот осажда-

ются преимущественно только двухатомные молекулы индия или трехатомные молекулы мышьяка.

Из рис. 4d следует, что столбообразная пустота, сформированная на поверхности кристалла германия или кремния, в процессе интенсивного легирования остается постоянно открытой. На поверхность кристалла в столбообразную пустоту осаждается трехатомная или двухатомная молекула, и происходит полная блокировка дальнейшего проникновения в столбообразную пустоту других молекул примеси. Это обусловлено малой энергией связи молекул с атомами внутри и существенно большей энергией связи с молекулами вокруг столбообразной пустоты [6].

Внутренняя структура твердого тела (кристалла) формируется объемными кластерами¹. Формирование твердого тела объемными кластерами рассмотрено в работах автора [8, 9]. В результате установлено, что в узлах кристаллической структуры находятся положительно заряженные ионы ядер атомов кристалла, а между ядрами атомов находятся электроны, которые не свободные, а хаотически обмениваются между атомами первой, второй и третьей координационных сфер внутри кристаллической решетки. В результате возникает эффект как бы свободных электронов.

Распределение электронов по энергиям внутри кристаллической решетки экспериментально получено рентгеноскопией, а строгая теория разработана и описана в работах [10, 11], что позволило определить величину смещения границы ионизации атомов, зону проводимости и запрещенную зону кристалла до уровня Ферми.

В качестве основы в транзисторах используют кремний или германий. Эти элементы формируются трехатомными молекулами [6]. Результаты расчета распределения электронов по энергиям для кристаллов кремния и германия приведены на рис. 5 [10].

Процесс легирования полупроводников осуществляется трехатомными или двухатомными молекулами [15, 16]. Поэтому внутрь столбообразной пустоты кремния или германия будут осаждаться в основном трехатомные молекулы мышьяка или двухатомные молекулы индия (рис. 6). Внедренные молекулы на поверхности полупроводникового кристалла самопроизвольно распадаются на атомы. Атомы на поверхности кристалла полупроводниковой основы внутри столбообразной пустоты вследствие обменного взаимодействия пребывают в виде отрицательных ионов (рис. 6). На основании этих данных была получена концентрация атомов примеси в столбообразной пустоте и в среднем на всей легированной площади полупроводниковой основы. Рассмотрим последовательно, как это происходит.

¹ Экспериментально Г. А. Месяцем [12–14] было установлено, что в катодном пятне мощного дугового разряда разрушение осуществляется отдельными частицами эктонами, полученный размер которых совпадает с объемными кластерами, т. е. эктоны – это объемные кластеры, которые формируют кристалл [14].

На основании рис. 6d эффективный радиус столбообразной пустоты для кремния равен $3,5 \text{ \AA}$, а для германия с учетом разности размеров атомов составляет $3,796 \text{ \AA}$. На каждую столбообразную пустоту на поверхности кремния приходится круговая поверхность радиусом $r_k = 1,54 \cdot 10^{-9} \text{ м}$. Следовательно, при 20 % дефектности эффективная поверхностная плотность столбообразных пустот для кремния составит $\sim 1,07 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$, а для германия это $\sim 8,73 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$.

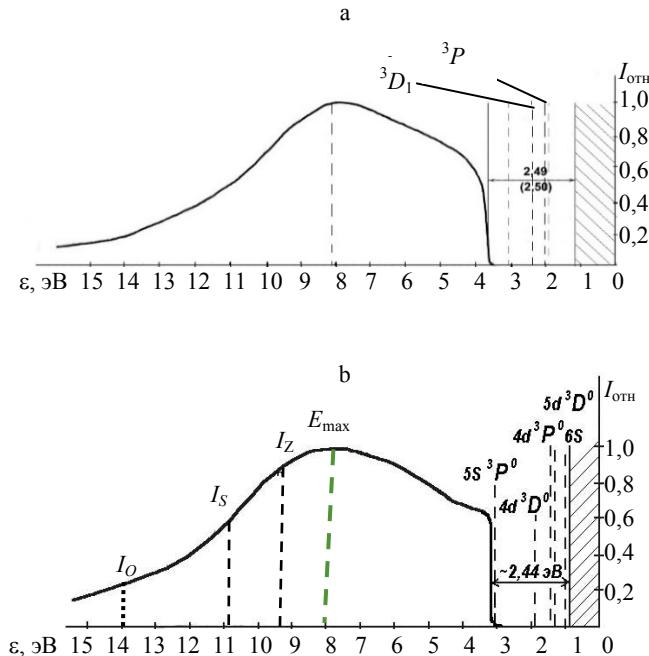


Рис. 5. Распределение электронной плотности по энергиям для:
а – кремния; б – германия [10, 11].

Fig. 5. Distribution of electron density by energy for:
a – silicon; b – germanium [10, 11].

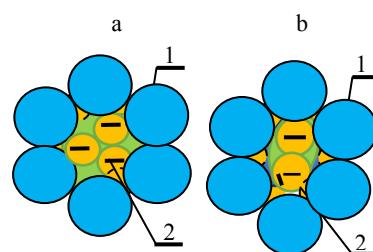


Рис. 6. Расположение внутри столбообразной пустоты полупроводниковой основы:
а – трехатомных молекул мышьяка; б – двухатомных молекул индия;
1 – молекулы полупроводника; 2 – атомы примеси

Fig. 6. Arrangement a columnar void of the semiconductor base:
a – triatomic arsenic molecules; b – diatomic indium molecules inside;
1 – semiconductor molecules; 2 – impurity atoms

При температуре кипения испарение мышьяка происходит желтого цвета, твердое тело которого обладает кубической структурой. Такая структура кристалла создается трехатомными молекулами. Поэтому легирование полупроводниковой основы мышьяком происходит трехатомными молекулами, а индий заполняет столбообразные пустоты двухатомными молекулами. При этом в столбообразную пустоту проникает только одна молекула.

Все тела в природе стремятся занять минимум потенциальной энергии. Поэтому на поверхности кристалла полупроводника происходит самопроизвольный распад трехатомных молекул мышьяка и двухатомных молекул индия на атомы. Эффективная предельная концентрация введенных примесей в кремний атомов мышьяка составляет $5,04 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$, а для германия это $3,95 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$. Соответственно при полном заполнении столбообразных пустот атомами индия эти концентрации остаются прежними. Полного заполнения столбообразных пустот в процессе легирования полупроводниковой основы примесями получить невозможно. Однако в этом нет необходимости. После завершения процесса легирования все столбообразные пустоты полностью заполнены атомами мышьяка и индия, которые пребывают в виде отрицательных ионов.

Энергия связи отрицательных ионов с кристаллом полупроводниковой основы. Энергетическая схема в биполярных транзисторах, которая реализуется при легировании кремния и соответственно германия мышьяком и индием, приведена на рис. 7. Начало отсчета энергии (0) соответствует рис. 5.

Экспериментально доказано, что легирование поверхности полупроводниковой основы происходит только на глубину мономолекулярного слоя [15, 16]. В результате коллективного взаимодействия атомов примеси на поверхности кристалла в столбообразных пустотах их эффективная энергия связи возрастает до энергии смещения границы ионизации атомов полупроводниковой основы. Отрицательный ион на поверхности кристалла полупроводниковой основы в соответствии с рис. 7 связан с основной энергией

$$\Delta E = \Delta E_i - E_A, \quad (1)$$

где ΔE_i – смещение границы ионизации атомов полупроводниковой основы, которая определяет границу начала зоны проводимости полупроводникового кристалла; E_A – энергия сродства атомов примеси, которые находятся в зоне проводимости.

Переход (1) для отрицательного иона не запрещен, и он происходит в зоне проводимости вследствие перехода из связанного состояния в свободное состояние (рис. 5). Образующийся положительный заряд в начале зоны проводимости своим полем компенсирует поле, создаваемое отрицательными ионами примеси.

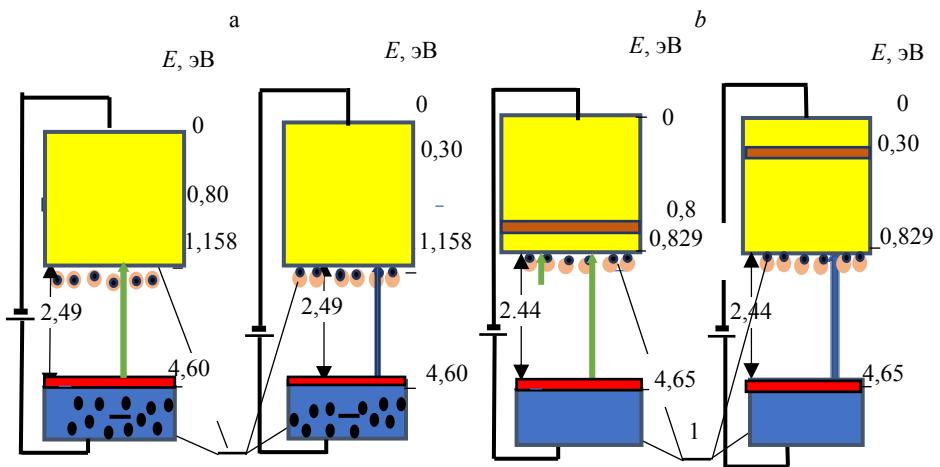


Рис. 7. Энергетическая схема расположения примесей в столбообразной пустоте при легировании поверхности (111) мышьяком и индием: а – кремния; б – германия, 1 – связанные электроны

Fig. 7. Energy diagram of the impurity distribution in a columnar void when the (111) surface is alloyed with arsenic and indium: a – silicon; b – germanium,
1 – bound electrons

Молекулы примесей, которые осаждаются на поверхностный слой вокруг столбообразной пустоты полупроводниковой основы германия или кремния (рис. 4d), непосредственно взаимодействуют с молекулами поверхностного слоя полупроводниковой основы, т. е. в конечном итоге с катодом и анодом из алюминия. В этом случае образование отрицательных ионов молекул примеси происходит более сложным образом.

Следует учитывать, что молекулы поверхностного слоя германия или кремния также обладают энергией сродства к электрону и тогда взаимодействовать осажденные молекулы будут уже с молекулами поверхностного слоя полупроводниковой основы вокруг столбообразных пустот, т. е. с молекулами германия или кремния. Произойдет взаимодействие между отрицательными ионами молекул полупроводниковой основы и осажденными молекулами примеси с образованием отрицательных ионов трехатомных молекул [15, 16]. При этом реализуются реакции обмена электронами между молекулами вокруг столбообразной пустоты следующего вида:



С учетом влияния температуры реакции (2) возникают достаточно эффективно. В этом случае знакопеременная структура поверхности не нарушается, но ионизация отрицательных ионов молекул не происходит, так как электроны в трехатомных молекулах примеси находятся в связанном состоянии с энергией сродства более 2–4 эВ [17]. Поэтому такие электроны в принципе не могут участвовать в формировании электрического тока проводимости или смещения, так как являются связанными достаточно прочно на основании рис. 6а, а также размеров атомов и молекул (табл. 1).

Таблица 1

**Значения радиусов атомов в кристалле, молекуле и свободных атомах,
а также сродство к электрону и встроенного атомного электрического момента
в атомах и молекулах**

**Atomic radius values in crystals, molecules, and free atoms,
as well as electron affinities and built-in atomic electric moments
in atoms and molecules**

Параметр	Осаждаемые частицы и основа				
	Германий	Кремний	Мышьяк	Индий	Алюминий
Радиус атома в кристалле, Å	1,39	1,18	1,200	1,66	1,43
Радиус свободного атома, Å	1,536	1,475	1,390	1,998	1,817
Радиус молекулы, Å	2,210	2,122	3,226	3,336	2,614
Сродство к электрону атомов, эВ	1,23	1,5 (1,38)	0,81	0,3	0,44
Дипольный электрический момент атома, Кл·м ·10 ³⁰	2,618	5,10	2,980	1,331	3,41
Величина заряда в центре молекулы, Кл·10 ²⁰	1,704	3,458	1,908	-0,666	2,135

Каждая молекула в столбообразной пустоте распадается на атомы, которые превращаются в отрицательные ионы. На три отрицательных иона мышьяка и на два отрицательных иона индия в центре столбообразной пустоты полностью воздействует приложенное внешнее электрическое поле. При известном объеме столбообразной пустоты и количества в ней отрицательных ионов определяется их концентрация, а при заданной температуре и приложенном внешнем электрическом поле происходит процесс ионизации отрицательных ионов и возникает электрический ток смещения. Как это происходит, рассмотрим во второй части.

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ строения твердого тела, поверхность которого формируется молекулами, а внутренняя область – это кристалл. Молекулы на поверхности группируются в поверхностные кластеры с образованием и межкластерных столбообразных пустот, через которые виден кристалл. Кристалл формируется объемными кластерами.

2. Нанесение покрытий на поверхность твердого тела осуществляется молекулами и даже поверхностными кластерами. Молекулы проникают в столбообразные пустоты, где распадаются на атомы с превращением в отрицательные ионы.

3. Отрицательные ионы в транзисторах располагаются в зоне проводимости полупроводниковой основы, и их ионизация приводит к формированию переменного электрического поля в этой зоне.

4. Отрицательные ионы внутри столбообразной пустоты расположены в зоне проводимости, и это не позволяет в процессе легирования проникать в зону проводимости более одной молекулы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жеребцов, И. П. Основы электроники / И. П. Жеребцов. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
2. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника, учеб. для вузов / Ю. С. Забродин. М.: Альянс, 2013. 496 с.
3. Гладков, Л. Л. Физические основы электроники: учеб. пособие / Л. Л. Гладков, И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич. Минск: Белорусская государственная академия связи, 2017. 227 с.
4. 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.
5. Binning, G. Scanning Tunneling Microscopy / G. Binning, H. Rohrer // Helvetica Physica Acta. 1982. Vol. 55, No 6. P. 726–735. <https://doi.org/10.5169/seals-115309>.
6. Гречихин, Л. И. Исследования поверхностного слоя кремния с напылением индия / Л. И. Гречихин, Ю. Шмермбекк. Берлин: Lambert Academic Publishing, 2015. 80 с.
7. Гречихин, Л. И. Взаимодействие напыляемых частиц с поверхностью твердого тела / Л. И. Гречихин, Ю. Шмермбекк // Авиационный вестник. 2021. № 5. С. 21–28.
8. Гречихин, Л. И. Формирование p - и n -проводимости отрицательными ионами / Л. И. Гречихин // Авиационный вестник. 2022. № 6. С. 8–16.
9. Gretschikhin, L. I. Formation of p - n -Conductivity in Semiconductors / L. I. Gretschikhin // Journal Military Technical Courier Scientific Periodical of the Ministry of Defence of the Republic of Serbia. 2018. Vol. 66, No 2. P. 304–321.
10. Гречихин, Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий. Общие основы, механические, тепловые и эмиссионные свойства / Л. И. Гречихин. Минск: Технопринт, 2004. 399 с.
11. Гречихин, Л. И. Наночастицы и нанотехнологии / Л. И. Гречихин. Минск: Право и экономика, 2008. 406 с.
12. Месяц, Г. А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга / Г. А. Месяц. М.: Наука, 2000. 424 с.
13. Месяц, Г. А. Эктоны в электрических разрядах / Г. А. Месяц // Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 57, вып. 2. С. 88–90.
14. Месяц, Г. А. Эктон – лавина электронов из металла / Г. А. Месяц // УФН. 1995. Т. 165, № 6. С. 601–626. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0165.199506a.0601>.
15. Гречихин, Л. И. Вольт-амперные характеристики выпрямительных диодов металл–полупроводник. Ч. 1: Формирование токов проводимости и токов смещения на p - n переходе / Л. И. Гречихин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 3. С. 209–229. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-209-229>.
16. 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>.
17. 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.

REFERENCES

1. Zherebtsov I. P. (1990) *Basics of Electronics*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. 352 (in Russian).
2. Zabrodin Yu. S. (2013) *Industrial Electronics*. Moscow, Al'yans Publ. 496 (in Russian).
3. Gladkov L. L., Gulakov I. R., Zenevich A. O. (2017) *Physical Principles of Electronics*. Minsk, Belarusian State Academy of Telecommunications. 227 (in Russian).
4. 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).
5. Binning G., Rohrer H. (1982) Scanning tunneling microscopy. *Helvetica Physica Acta*, 55 (6), 726–735. <https://doi.org/10.5169/seals-115309>.
6. Gretchikhin L. I., Schmermbeck Yu. (2015) *Studies of the Surface Layer of Silicon with Indium Deposition*. Berlin: Lambert. Academic Publishing. 80 (in Russian).
7. Gretchikhin L., Shmermbek J. (2021) Interaction of Sprayed Particles with Surface Solid Body. *The Aviation Herald*, (5), 21–28 (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. Gretchikhin L. (2018) Formation of p-, n-conductivity in semiconductors. *Vojnotehnički Glasnik = Military Technical Courier*, 66 (2), 304–321. <https://doi.org/10.5937/vojtehg66-15935>.
10. Gretchikhin L. I. (2004) *Physics of Nanoparticles and Nanotechnology. General Principles, Mechanical, Thermal and Emission Properties*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 399 p. (in Russian).
11. Gretchikhin L. I. (2008) *Nanoparticles and Nanotechnology*. Minsk, Pravo i Ekonomika Publ. 406 (in Russian).
12. Mesyats G. A. (2000) *Ectons in a Vacuum Discharge: Breakdown, Spark, Arc*. Moscow, Nauka Publ. 424 (in Russian).
13. Mesyats G. A. (1993) Ectons in electric discharges. *JETP Letters*, 57 (2), 95–98.
14. Mesyats G. A. (1995) Ecton or electron avalanche from metal. *Physics-Uspekhi*, 38 (6), 567–590. <https://doi.org/10.1070/pu1995v038n06abeh000089>.
15. Gretchikhin L. I. (2025) Volt-ampere Characteristics of Metal-semiconductor Rectifier Diodes. Part 1: Formation of Conduction Currents and Displacement Currents at the p–n Junction. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 68 (3), 209–229. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-209-229> (in Russian).
16. Gretchikhin L. I. (2025) Volt-ampere Characteristics of Metal-semiconductor Rectifier Diodes. Part 2: Volt-ampere Characteristics of Metal-semiconductor Diodes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 68 (4), 291–310. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-4-291-310> (in Russian).
17. Babichev A. I., Babushkina N. A., Bratkovsky A. M., Brodov M. E., Bystrov M. V., Vinogradov B. V. [et al.], I. S. Grigoriev, E. D. Meylikhov (eds.) (1991) *Physical Quantities: Reference Textbook*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1232 (in Russian).

Received: 8 August 2025

Accepted: 10 October 2025

Published online: 28 November 2025

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-504-516>

UDC 378

Distributed Generation Planning Using the R Method

S. Gade¹⁾, M. Sangole¹⁾, R. Agrawal²⁾, D. Patil¹⁾, R. Jha¹⁾,
Y. Risodkar¹⁾, A. Kumar¹⁾

¹⁾Sandip Institute of Engineering and Management (Nashik, Republic of India),

²⁾Guru Gobind Singh College of Engineering and Research Center (Nashik, Republic of India)

Abstract. Nowadays micro-grids are employed to improve the resilience and stability of power systems. The supervised operation of several distributed generation (DG) in a distribution system will give customers enough options to select the better solution under various priorities. Strategic planning studies with a variety of options are presented to the decision-maker. Major problems faced by decision-makers are assigning weights to the attributes, using attribute data for various alternatives, and making final decisions. These problems can be effectively managed in the multi-attribute decision-making approach. It deals with choosing the best option from a large but finite number of options while taking into account how each option performs concerning several attributes. In this paper optimal planning of a DG using the R method considering various configurations such as hybrid DG, Micro-grid, and the grid is presented. Three attributes such as reliability, incremental cost, and T&D losses are considered in this paper. The results are compared with the Analytical Hierarchy Process approach. The R method is a relatively simple and efficient as it requires less time, limited attention of the decision maker, and a high capacity for processing the information. This research paper will help to develop a control algorithm using fuzzy for strategic planning of DGs.

Keywords: sensor, detecting diode, terahertz radiation, 3D model, resonance frequency, HFSS, conversion efficiency, reflection losses, directivity

For citation: Gade S., Sangole M., Agrawal R., Patil D., Jha R., Risodkar Y., Kumar A. (2025) Distributed Generation Planning Using the R Method // *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (6), 504–516. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-504-516>

Планирование распределенной генерации с использованием метода R

С. Гадэ¹⁾, М. Санголе¹⁾, Р. Агравал²⁾, Д. Патиль¹⁾, Р. Джха¹⁾,
Й. Рисодкар¹⁾, А. Кумар¹⁾

¹⁾Сандипский институт инженерии и менеджмента (Нашик, Республика Индия),

²⁾Колледж Гуру Гобинд Сингх Инженерно-исследовательского центра
(Нашик, Республика Индия)

Реферат. В настоящее время микросети используются для повышения устойчивости и стабильности энергосистем. Контролируемая эксплуатация нескольких установок распреде-

Адрес для переписки

Патиль Дипак Пандуранг
Сандипский институт инженерии
и менеджмента
«Дип Амрит», Плот № 46+47/3
Гаджанан Чоук, Индранагри, Каматваде
Нашик, Республика Индия
Пин код 422008
dipak.patil@siem.org.in

Address for correspondence

Patil Dipak Pandurang
Sandip Institute of Engineering
and Management
“DEEP AMRIT”, Plot No 46+47/3
Gajanan Chowk, Indranagri, Kamatwade
Nashik (MS), Republic of India
Pin Code 422008
dipak.patil@siem.org.in

ленной генерации (DG) в системе распределения предоставит клиентам достаточно возможностей для выбора лучшего решения с учетом различных приоритетов. Лицу, принимающему решение, предоставляются исследования стратегического планирования с различными вариантами. Основными проблемами, с которыми сталкиваются лица, принимающие решения, являются присвоение весовых коэффициентов атрибутам, использование данных атрибутов для различных альтернатив и принятие окончательных решений. Эти проблемы можно эффективно решить, используя многоатрибутивный подход к принятию решений. Данный подход позволяет осуществлять выбор наилучшего варианта из большого, но конечного числа вариантов с учетом того, как каждый вариант способен выполнять несколько атрибутов. В данной статье представлено оптимальное планирование распределенной генерации с использованием метода R, учитывающего различные конфигурации, такие как гибридная распределенная генерация, микросеть и сетка. Данная статья рассматривает три характеристики: надежность, дополнительные затраты и потери при передаче и распределении. Результаты сравниваются с подходом аналитического иерархического процесса. Метод R относительно прост и эффективен, поскольку требует меньше времени, ограниченного внимания лица, принимающего решения, и высокой производительности для обработки информации. Данная исследовательская работа позволит разработать алгоритм управления с использованием нечеткой логики стратегического планирования работы распределительных групп.

Ключевые слова: чувствительный элемент, детекторный диод, терагерцовое излучение, трехмерная модель, резонансная частота, HFSS, эффективность преобразования, потери на отражение, коэффициент направленного действия

Для цитирования: Планирование распределенной генерации с использованием метода R / С. Гадэ [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 6. С. 504–516. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-504-516>

Introduction

Nowadays in developing countries like India Distributed generation (DG) has become an important part of the power system network. It has various advantages like minimum generation cost and transmission cost, minimum transmission and distribution losses, less pollution, and improved reliability of the system [1, 2]. In India government is motivated to utilize decentralized clean energy resources like solar PV, Wind and Biogas, etc. generation to provide electricity in rural areas where it is not served by centralized transmission and distribution infrastructure of electrical energy. This results in transmission cost savings and a reduction in fossil fuel emissions. Micro-grids are employed to increase the resilience and stability of power systems [3]. The Micro-grid comprises a collection of electrically distinct linked loads and DGs.

There are two modes of operation of the Micro-grid: 1. Grid-connected and 2. Islanded mode. As per the availability of electricity, a Micro-grid can be switched ON and OFF from the grid and acts as an independently controlled structure concerning the grid [4].

Fig. 1 represents the basic structure of a Micro-grid which includes various types of loads, and DG resources including an energy storage system (ESS), main controller, smart meters and switching systems, protection equipment, communication systems as well as automated control system [3]. It provides lots of benefits such as low cost, less emission, minimum transmission losses with improved reliability of the system, and is more flexible than a backup generating unit. It consists of dispatchable and non-dispatchable DGs. Renewable energy sources (RES) are non-dispatchable units because they produce unpredictable

and irregular output power [5]. Because of the intermittency and volatility of the output, it is necessary to support ESS. The ESS plays a vital role in coordinating with the DGs to ensure appropriate generation from Micro-grids during the islanded as well as grid-connected modes of operation [6]. It can also be used for energy management during low-price hours the energy can be stored in ESS and can be used to supply load during peak hours [7]. Protective equipment and smart switches regulate the connection between loads and DGs. The function of the master controller is to connect or disconnect a Micro-grid from the utility grid according to economic and security issues. The smooth functioning of control operations and guarantee of uninterrupted, efficient, and reliable interaction amongst Micro-grid components is achieved with the help of advanced automation technologies for communications, and control. Islanded mode of operation is the most distinguishing feature of Micro-grid.

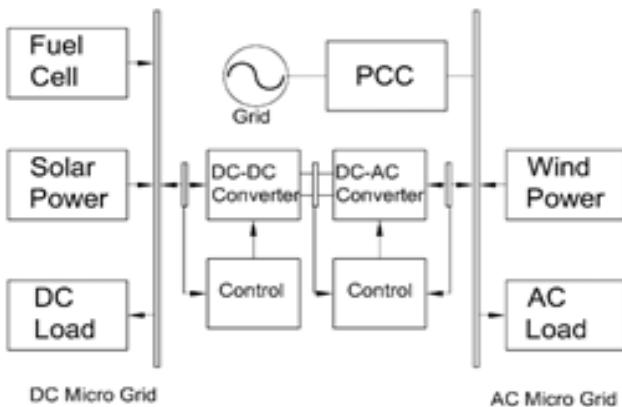


Fig. 1. Basic Structure of Micro Grid

The study of Micro-grids has grown considerably during the past few years in light of the growing interest in their application. Challenges faced while integrating the Micro-grids with the utility grid and the solutions to overcome these challenges are elaborated in [8]. The status of Micro-grids in India is presented in [9]. To address the constraints and difficulties of the distribution network, such as the optimum size and placement of a distribution substation and DGs, a multi-dimensional framework for optimal active distribution network planning is introduced in [10, 11]. In the distribution system planning problem, the planning horizon is split into various subperiods and is solved by considering the investment and operating costs [12]. Mathematical models for the analysis of the economic benefits of DGs are presented in [13]. Based on the equal incremental rate of non-renewable fuel consumption, the economical dispatching and optimal power flow computation for Micro-grid integrated systems were developed by [14]. A power flow algorithm for a distribution network with DGs was proposed in [15]. Using load flow analysis and optimization techniques the optimum location and size of DGs were determined for a Micro-grid [16]. The cost of generation of DGs and non-renewable energy sources is determined and is used for long-term planning. Multi-objective optimization model of iso-

lated Micro-grids was proposed by [17]. Ant colony optimization technique was used to reduce pollution and minimize the cost of generation.

From the literature review, it is concluded that the deployment of some recent innovations in distribution systems, such as Micro-grids, and the supervised controlled operation of several DGs will give enough options to select better solutions under various priorities to the users. The strategic planning studies provide a variety of options to the decision-maker, including grid connection, hybrid systems, and the newest option, micro-grid. The Micro-grid option has received a lot of attention from researchers, and while there are numerous advantages claimed for it, they must be supported by analytical techniques that can quantify the advantages. In old techniques, the significant aspects and relationships between the system's elements are established in the initial phase. An additive utility function with appropriate weights is developed in the second phase. With these features for special attributes, comparing multiple options is simple. The results, however, may be distorted by the adequacy and quality of the supplied data. This problem can be effectively managed using the multi-attribute decision-making (MADM) approach.

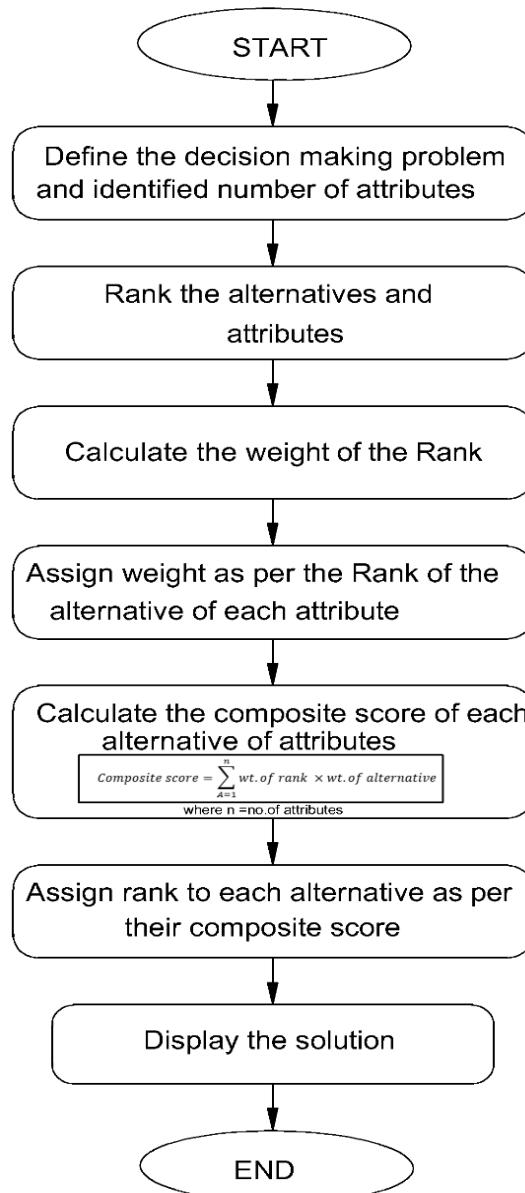
The MADM problems deal with choosing the best option from a large but finite number of options while taking into account how each option performs concerning several attributes. Assigning weights to the attributes, use of attribute data for various alternatives, dealing with qualitative attributes or incomplete information, and making final decisions are the major problems faced by the decision-maker. Several MADM methods like Analytical Hierarchy Process (AHP), Analytical Network Process, Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations, Decision-making Trial and Evaluation Laboratory, Best-Worst Method, etc. are available in the literature. These methods are used by many researchers however these have demerits like requiring lengthy calculations and with the increased number of alternatives and attributes the method become more complex. Different methods used for normalization of data may change the rankings of alternatives and make the calculation procedure complex. The AHP method was implemented by [18, 19] for optimal DG planning. The AHP approach generates numerous comparison matrices by comparing attributes and alternatives. The dimension of these comparison matrices is completely depended upon the number of alternatives and attributes. Additionally, the ranks of the alternatives will differ depending on the weights assigned to the attributes using the arithmetic mean, geometric mean, etc.

Strategic resource planning for conventional resources was done using the MADM methodology. Moreover, cost-benefit analysis, the potential for deferring T and D, a decrease in T and D losses, etc. were typically used to support the viability of DG in a power system. These are all significant issues, but they cannot be the only ones used to make decisions. In this paper optimal planning of a distribution system using the R method considering various configurations of Micro-grids such as hybrid DG, Micro-grid, and the grid is presented.

This paper contributes to providing a detailed discussion on:

1. R method for strategic Planning studies based on the MADM approach.
2. Implementation of the R method for DG planning in the distribution system.
3. Analysis of the strategic planning of DG using the R method for various loading conditions and expansion strategies.

Rest of the paper is structured as follows: Section 2 covers the fundamentals of the R method. Implementation of the R-method for strategic planning of distributed generation is presented in Section 3. Results and discussion are elaborated in Section 4 and the paper is concluded in Section 5.



The R Method

From the literature review of the MADM techniques, it is concluded that the weights of the attributes are derived either by objective or subjective approach. In the objective approach, there is no role of the decision maker in deciding the preference. On the other hand, in the subjective approach, the weights are assigned by the ranking method. There is a need for the development of a simple and efficient technique to solve complex decision-making problems having many attributes and solutions. In 2021, V Rao proposes the R method for strategic planning which is based on the alternatives and attribute ranking [20].

Decision table in MADM approaches contains alternatives, attributes, attribute weights, and performance metrics for the alternatives. The prime goal of the decision maker is to identify the best alternative by ranking all alternatives from the decision table as per the decision-making methodology. Fig. 2 shows the flow chart of step-by-step procedure of the R method.

Fig. 2. Flow Chart of R Method

Implementation of the R Method for Strategic Planning of Distributed Generation

For most developing nations worldwide, the main issues are the growing demand for energy, 100 % rural electrification, and the limited supply of conventional generation resources. In India, these problems are overcome by increasing the use of renewable energy sources such as solar, wind fuel cells, etc. As of Feb. 2023, the installed capacity of renewable resources is almost 130 GW. Electricity generation by renewable resources has increased by 109 % since 2014.

Problem Formulation. In India, for the electrification of rural areas, micro-grid is the most appropriate option. It is also observed that there is the possibility of interconnecting two or more renewable resources such as solar, wind bio-gas, etc. The main advantage of micro-grids is the increased reliability and security of the system. However, finding a suitable combination of sources of energy to supply load demand is the biggest challenge in micro-grid operation. Social/technical/political issues make the decision-making process complicated. There are various options such as stand-alone, hybrid, and micro-grid are available to the decision-maker. The stakeholders' perceptions of various competing attributes must also be taken into account. Therefore, the problem is simply to evaluate the various options and find the ranking of the same as per the attributes by using any of the effective MADM techniques.

Implementation of R Method. In this paper strategic planning for DG using the R method is presented. Various loading conditions such as light load, and high load of medium voltage distribution system were considered for the same. Various types of loads for respective loading conditions are given in Table 1 [19]. The analysis is carried out for three different attributes such as:

Attribute 1: Incremental Cost.

Attribute 2: Transmission and distribution (T&D) losses.

Attribute 3: % time duration for which the load remains unserved for a month.

Table 1
Various types of Loading Conditions

Load	High Load (kW)	Low Load (kW)
Residential Load	353	122
Commercial Load	88	31
Industrial Load	328	114
Agriculture Load	1751	607
Total Load	2520	874

The values of each attribute for different expansion strategies for various loading conditions given in Table 2 are taken from [21].

Table 2
 Values of each attribute for different expansion strategies [21]

Expansion Strategies	Attribute 1	Attribute 2	Attribute 3
Low Load condition			
Grid Mode	0.004	0.71428	1
Hybrid Mode	0.0433	0	0.1249
Micro-grid Mode	0.06105	0	0.0416
High Load condition			
Grid Mode	1	1	0.7498
Hybrid Mode	0.9035	0	0.2499
Micro-grid Mode	0.7465	0	0.0166

Following is the step-by-step procedure of the R method.

Step 1: Formulate the problem of DG planning and frame the attributes required.

Step 2: Run the R Method algorithm and prepare the decision table with performance indicators of the alternatives corresponding to the attributes.

Step 3: Rank the attributes as per the various cases considered for study.

Step 4: Rank the alternatives as per the performance indicator. It may be quantitative or qualitative.

Step 5: Calculate the corresponding weights using the ranks that were given to the attributes and alternatives.

Step 6: Calculate the composite score of the alternatives by adding the product of the weights of attributes and the corresponding weights of alternatives.

Step 7: Arrange the alternatives in descending order. An alternative with the highest composite score will be the best choice.

Results and Discussion

In the MATLAB environment, the R-method algorithm is written. For the analysis, various loading conditions and expansion strategies with different priorities of attributes are considered.

For each expansion strategy, the highest priority attribute will be different. For the customer, reliability is the highest priority however for the utility T and D losses and the cost are important for micro-grids. To prove the efficacy of the R method for strategic planning of DGs the program is run for various cases with different load conditions such as Low Load, High Load, and Combined Load conditions for various attributes priorities.

The result analysis is carried out for three cases considering each attribute at the highest priority. The three cases considered are as follows.

Case 1: Attribute 3 i. e. reliability of supply is at the highest priority.

Case 2: Attribute 2 i. e. efficiency (T & D Losses) of the system is considered the highest priority.

Case 3: Attribute 1 i. e. Incremental Cost is at the highest priority.

The decision table which consists of the weight of the attributes, composite score, and composite rank for different priorities of attributes with high and low loading conditions for various expansion strategies are given below from Table 3 to Table 11. The results of the R-method are compared with the results of the AHP method presented in [21].

Table 3
Decision Table

Expansion Strategy	Attribute 1	Attribute 2	Attribute 3	Composite score	Composite Rank	Variance of composite distance (Results of ref. [21])
Grid + High load	0.10510	0.10510	0.11163	0.07160	6	0.690
Grid + Low load	0.29955	0.11163	0.10510	0.10272	4	0.804
Hybrid + High load	0.11163	0.15766	0.12062	0.08586	5	0.186
Hybrid + Low load	0.19970	0.15766	0.13413	0.10429	3	0.097
Microgrid + High load	0.12062	0.15766	0.29955	0.14092	1	0.162
Microgrid + Low load	0.13413	0.15766	0.19970	0.11322	2	0.102
Rank of Attribute	0.16339	0.19970	0.29955			
	3	2	1			

Table 4
Decision Table Case 1: Low Load Condition

Expansion Strategy	Attribute 1	Attribute 2	Attribute 3	Composite score	Composite Rank
Grid	0.45205	0.24658	0.24658	0.29724	2
Hybrid Mode	0.30137	0.27123	0.30137	0.29229	3
Microgrid	0.24658	0.27123	0.45205	0.34689	1
Rank of Attribute	0.24658	0.30137	0.45205		
	3	2	1		

Table 5
Decision Table Case 1: High Load Condition

Expansion Strategy	Attribute 1	Attribute 2	Attribute 3	Composite score	Composite Rank
Grid	0.24658	0.24658	0.24658	0.24658	3
Hybrid Mode	0.30137	0.27123	0.30137	0.29229	2
Microgrid	0.45205	0.27123	0.45205	0.39756	1
Rank of Attribute	0.24658	0.30137	0.45205		
	3	2	1		

Case 1: Reliability of supply is at the highest priority.

The program is run for all loading conditions with reliability as the highest priority. The results are presented in Table 3 to Table 5 for combined load, low, and high load conditions respectively. From the output results it is concluded that the Micro-grid option is the most reliable option for any load condition.

In [21] the variance of the composite distance is minimum for hybrid mode with low load and micro-grid with low load conditions so these are selected as the best planning option. However, the load is variable and for high-load conditions, the AHP method is not performing well. On the other hand, in this paper, from the output results of the R method used for DG planning, it is observed that the composite rank of micro-grid options for high as well as low load is rank 1 and rank 2 respectively hence as per the load condition best planning option can be selected.

Case 2: Efficiency of the system is at the highest priority.

In this case 2 the program is run considering T and D losses at the highest priority for all loading conditions. The results are tabulated in Table 6 to Table 8 for Low, high, and combined load conditions respectively. In this case, also the micro-grid option is found to be the most efficient option in the distribution system for any load condition.

Table 6
Decision Table Case 2: Low Load Condition

Expansion Strategy	Attribute 1	Attribute 2	Attribute 3	Composite score	Composite Rank
Grid	0.45205	0.24658	0.24658	0.29724	2
Hybrid Mode	0.30137	0.27123	0.30137	0.28775	3
Microgrid	0.24658	0.27123	0.45205	0.31965	1
Rank of Attribute	0.24658	0.45205	0.30137		
	3	1	2		

Table 7
Decision Table Case 2: High Load Condition

Expansion Strategy	Attribute 1	Attribute 2	Attribute 3	Composite score	Composite Rank
Grid	0.24658	0.24658	0.24658	0.24658	3
Hybrid Mode	0.30137	0.27123	0.30137	0.28775	2
Microgrid	0.45205	0.27123	0.45205	0.37031	1
Rank of Attribute	0.24658	0.45205	0.30137		
	3	1	2		

Table 8
Decision Table Case 2: Combined Load Condition

Expansion Strategy	Attribute 1	Attribute 2	Attribute 3	Composite score	Composite Rank
Grid + High load	0.10510	0.10510	0.11163	0.07095	6
Grid + Low load	0.29955	0.11163	0.10510	0.10337	4
Hybrid + High load	0.11163	0.15766	0.12062	0.08955	5
Hybrid + Low load	0.19970	0.15766	0.13413	0.10664	3
Microgrid + High load	0.12062	0.15766	0.29955	0.12675	1
Microgrid + Low load	0.13413	0.15766	0.19970	0.10902	2
Rank of Attribute	0.16339	0.29955	0.19970		
	3	1	2		

Table 9
Decision Table Case 3: Low Load Condition

Expansion Strategy	Attribute 1	Attribute 2	Attribute 3	Composite score	Composite Rank
Grid	0.45205	0.24658	0.24658	0.33946	1
Hybrid Mode	0.30137	0.27123	0.30137	0.29394	3
Microgrid	0.24658	0.27123	0.45205	0.31458	2
Rank of Attribute	0.45205	0.24658	0.30137		
	1	3	2		

Table 10
Decision Table Case 3: High Load Condition

Expansion Strategy	Attribute 1	Attribute 2	Attribute 3	Composite score	Composite Rank
Grid	0.24658	0.24658	0.24658	0.24658	3
Hybrid Mode	0.30137	0.27123	0.30137	0.29394	2
Microgrid	0.45205	0.27123	0.45205	0.40747	1
Rank of Attribute	0.45205	0.24658	0.30137		
	1	3	2		

Table 11
Decision Table Case 3: Combined Load Condition

Expansion Strategy	Attribute 1	Attribute 2	Attribute 3	Composite score	Composite Rank
Grid + High load	0.10510	0.10510	0.11163	0.07095	6
Grid + Low load	0.29955	0.11163	0.10510	0.12896	1
Hybrid + High load	0.11163	0.15766	0.12062	0.08329	5
Hybrid + Low load	0.19970	0.15766	0.13413	0.11236	3
Microgrid + High load	0.12062	0.15766	0.29955	0.12171	2
Microgrid + Low load	0.13413	0.15766	0.19970	0.10582	4
Rank of Attribute	0.29955	0.16339	0.19970		
	1	3	2		

Case 3: Incremental cost is at the highest priority.

To test the proposed algorithm for economic operation Attribute 1 i.e. incremental cost is kept at the highest priority. From the output result (refer to Table 9 to Table 11) it is found that for economical operation of the distribution system during low and combined load conditions grid option is the most suitable whereas during high load conditions micro grid option is at rank 1.

The composite rank for different expansion strategies for combined load is shown in Fig. 3. From Fig. 3 it is clear that from a supply reliability and system efficiency point of view, the Microgrid strategy is most suitable for high as well as low load conditions. However, for incremental cost at top priority, the grid option during low load and the Microgrid option during high load conditions is found suitable. The ranking for various expansion strategies for reliable supply and efficient operation of the system is the same.

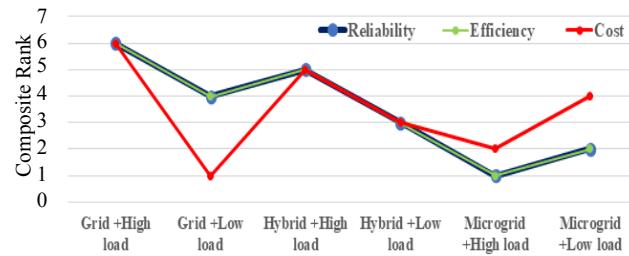


Fig. 3. Composite Rank for different expansion strategies with various attributes

Fig. 4 shows the graphical representation of the composite score for all the attributes of various expansion strategies. From Fig. 4 also it is clear that the composite score is the maximum for microgrid options with high as well as low load conditions for all cases. On the other hand, the difference in a composite score of first and second rank is very small i. e. 0.00725, and the third and fourth rank is 0.00654 is also very negligible for incremental cost at the highest priority.

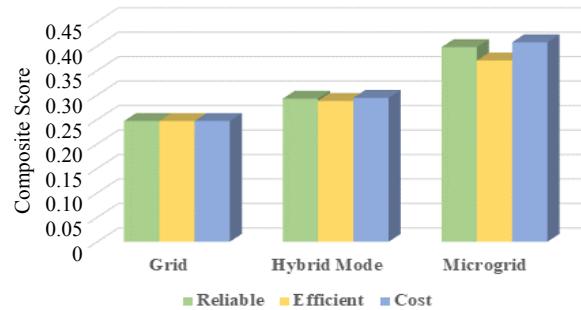


Fig. 4. Composite Score for different expansion strategies with various attributes

Fig. 5 and Fig.6 present the composite score for the grid, hybrid mode, and Microgrid strategies for reliable supply, efficiency of the system, and incremental cost as the highest priority during high and low load conditions respectively.

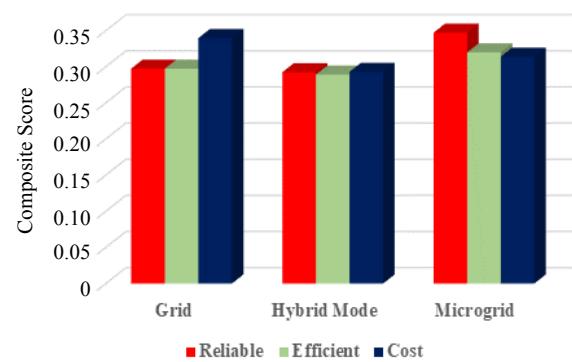


Fig. 5. Composite Score for different expansion strategies with various attributes during High Load Condition

From Fig.6, it is clear that during high load conditions Microgrid option is the most suitable for all three attributes i.e. reliability of supply, efficiency of the system, and incremental cost considered at highest priority.

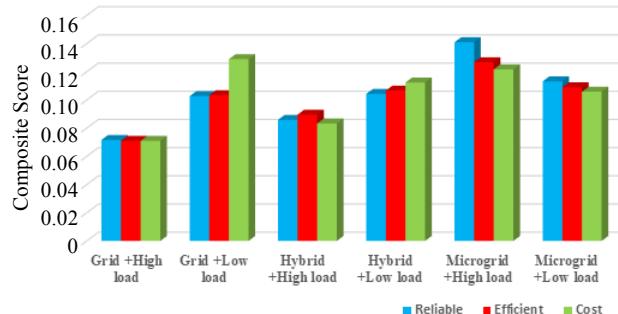


Fig. 6. Composite Score for different expansion strategies with various attributes during Low Load Condition

During low-load conditions for reliable supply and efficient system operation, the Microgrid option is most suitable however for incremental cost Grid option is most suitable.

Conclusion

Micro-grid is a small-scale power system having lots of benefits such as low cost, less emission, minimum transmission losses with improved reliability of the system, and more flexibility in operation. Smart switches and protective devices manage the connection between loads utility and DGs. The islanded mode of operation is the most salient feature of the Micro-grid. Micro-grid, and the supervised operation of several DGs in a distribution system, provide customers with enough options to select the better solution under various priorities. The MADM approach is most suitable to solve this problem. R-method is simple and easy to implement as compared to other MADM techniques. It also requires less time, limited attention of the decision maker, and a high capacity for processing the information. From the output results it is concluded that for the reliable supply, efficient system, and incremental cost Micro-grid option is most suitable during all loading conditions. This research paper can be extended by incorporating fuzzy with the R-method for developing the control algorithm for strategic planning of DGs.

REFERENCES

1. Willis H. L., Scott W. G. (2000) *Distributed Power Generation Planning and Evaluation*. New York: Marcel Dekker. <https://doi.org/10.1201/b16836>.
2. Dugan R. C., McDermott T. E., Ball G. J. (2000) Distribution Planning for Distributed Generation. *2000 Rural Electric Power Conference. Papers Presented at the 44th Annual Conference (Cat. No.00CH37071)*. Louisville, KY, USA, C4/1-C4/7. <https://doi.org/10.1109/REPCON.2000.848048>.
3. Hirsch A., Parag Y., Guerrero J. (2018) Micro-Grids: A Review of Technologies, Key Drivers, and Outstanding Issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 402–411. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.040>.

4. Parhizi S., Lotfi H., Khodaei A., Bahramirad S. (2015) State of the Art in Research on Microgrids: A Review. *IEEE Access*, 3, 890–925. <https://doi.org/10.1109/access.2015.2443119>.
5. Quiggin D., Cornell S., Tierney M., Buswell R. (2012) A Simulation and Optimisation Study: Towards a Decentralised Microgrid, Using Real World Fluctuation Data. *Energy*, 41 (1), 549–559. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.007>.
6. Khodaei A. (2015) Provisional Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6 (3), 1107–1115. <https://doi.org/10.1109/tsg.2014.2358885>.
7. Luo X., Wang J., Dooner M., Clarke J. (2015) Overview of Current Development in Electrical Energy Storage Technologies and the Application Potential in Power System Operation. *Applied Energy*, 137, 511–536. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>.
8. Nigim K. A., Lee W.-J. (2007) Micro Grid Integration Opportunities and Challenges. *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/pes.2007.385669>.
9. Dadhich S., Meena P., Singh S., Gupta A. K. (2019) A Feasibility Study of Microgrids in India. *2019 8th International Conference System Modeling and Advancement in Research Trends (SMART)*, 343–347. <https://doi.org/10.1109/smart46866.2019.9117339>.
10. Xiang Y., Liu J., Li F., Liu Y., Liu Y., Xu R., Su Y., Ding L. (2016) Optimal Active Distribution Network Planning: A Review. *Electric Power Components and Systems*, 44 (10), 1075–1094. <https://doi.org/10.1080/15325008.2016.1156194>.
11. Haffner S., Pereira L. F. A., Pereira L. A., Barreto L. S. (2008) Multistage Model for Distribution Expansion Planning with Distributed Generation—Part II: Numerical Results. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23 (2), 924–929. <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2008.917911>.
12. Haffner S., Pereira L. F. A., Pereira L. A., Barreto L. S. (2008) Multistage Model for Distribution Expansion Planning With Distributed Generation—Part I: Problem Formulation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23 (2), 915–923. <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2008.917916>.
13. Gil H. A., Joos G. (2008) Models for Quantifying the Economic Benefits of Distributed Generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23 (2), 327–335. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2008.920718>.
14. Naderi E., Seifi H., Sepasian M. S. (2012) A Dynamic Approach for Distribution System Planning Considering Distributed Generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27 (3), 1313–1322. <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2012.2194744>.
15. Xiaobo Z., Baohui Z. (2016) Optimal Power Distribution Method for Microgrids Integrated System. *2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 6115–6121. <https://doi.org/10.1109/ccdc.2016.7532095>.
16. Verma M. K., Yadav V. K., Mukherjee V., Mehta G. (2018) Planning and Optimizing the Cost of DGs for Stability of Green Field Distribution Network. *2018 3rd International Conference On Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/iot-siu.2018.8519912>.
17. Li G., Zhai X., Li Y., Feng B., Wang Z., Zhang M. (2016) Multi-objective Optimization Operation Considering Environment Benefits and Economy Based on Ant Colony Optimization for Isolated Micro-Grids. *Energy Procedia*, 104, 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.005>.
18. Sahraei-Ardakani M., Peydayesh M., Rahimi-Kian A. (2008) Multi attribute Optimal DG Planning under Uncertainty Using AHP Method. *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/pes.2008.4596815>.
19. Agalgaonkar A. P., Kulkarni S. V., Khaparde S. A. (2006) Evaluation of Configuration Plans for DGs in Developing Countries Using Advanced Planning Techniques. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21 (2), 973–981. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2006.873420>.
20. Rao R. V., Lakshmi J. (2021) R-Method: A Simple Ranking Method for Multi-Attribute Decision-Making in the Industrial Environment. *Journal of Project Management*, 223–230. <https://doi.org/10.5267/j.jpm.2021.5.001>.
21. Agalgaonkar A. P., Kulkarni S. V., Khaparde S. A. (2005) Multi-Attribute Decision Making Approach for Strategic Planning of DGs. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2005, 2213–2218. <https://doi.org/10.1109/pes.2005.1489531>.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-517-535>

УДК 004.4+621.1+621.373.8

Технологии улучшения эксплуатационных характеристик динамических газожидкостных теплоэнергетических установок при управляемом лазерном индуцировании регулируемых локальных конфигураций топологических микро- и наноструктур на внутренней металлической поверхности рабочих камер

Часть 1

Т. В. Рыжова¹⁾, Д. Д. Тумаркина²⁾, Д. Н. Бухаров²⁾, В. Д. Самышкин²⁾,
А. Ф. Лелекова²⁾, М. М. Аракелян³⁾, А. О. Кучерик²⁾, С. М. Аракелян²⁾

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

²⁾Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых (Владимир, Российская Федерация),

³⁾Ереванский государственный университет (Ереван, Республика Армения)

Реферат. В исследовании рассмотрено одно из направлений современной наноинженерии поверхности по технологиям управляемого формирования топологических покрытий заданной конфигурации при лазерном воздействии на различные образцы с учетом подходов для сложных нелинейных термодинамических систем с развитием динамических неравновесных процессов. Предлагаемые технологии имеют универсальный характер и весьма перспективны, в частности, для металлических материалов в рабочих камерах теплоэнергетических установок. При этом акцент сделан на новых физических принципах изменения функциональных характеристик материала образца с их оптимизацией под конкретные условия эксплуатации образца с формированием 1D – 3D микро- и наноструктур, в том числе дендритного типа с фрактальными объектами. Использованы методы управляемого лазерного синтеза поверхностных топологических структур в разных схемах эксперимента с лазерной аблацией. Эти регулируемые процессы реализуются на поверхности изделий без изменения объемных характеристик материала в отличие от технологий стандартной его термической обработки, например для повышения износостойкости. В первой части представляемой статьи речь идет о фундаментальной проблеме лазерной термодинамики возникновения дендритных/фрактальных структур на поверхности материала в условиях развития нестационарных теплофизических процессов. Акцент сделан на устойчивых поверхностных состояниях материала при его специализированной предварительной лазерной обработке, включая синтез различных неоднородных и многослойных конфигураций на поверхности с определенной 3D-топологией. Обсуждаются возможности достижения регулируемым способом необходимых характеристик используемого материала для улучшения эксплуатационных свойств различных систем. В частности, это относится и к динамическим газожидкостным теплоэнергетическим установкам при управляемом лазерном наведении регулируемых локальных конфигураций топологических микро- и наноструктур на внутренней металлической поверхности их рабочих камер. В качестве экспериментальной

Адрес для переписки

Рыжова Татьяна Викторовна
Белорусский национальный технический университет
Партизанский проспект, 77,
220107, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 250-36-95
ryzhovatv@bntu.by

Address for correspondence

Ryzhova Tatiana V.
Belarusian National Technical University
77, Partizansky Ave.,
220107, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 250-36-95
ryzhovatv@bntu.by

демонстрации рассмотрена микротрещиноватая структура поверхности металлоуглеродных материалов в модели их графитизации.

Ключевые слова: улучшение эксплуатационных характеристик теплоэнергетических установок, лазерно-индущиванные микро- и наноструктуры требуемой конфигурации, металлоуглеродные комплексы, энтропия поверхности с неоднородностями, моделирование дендритов, усиление электрического поля на неоднородностях

Для цитирования: Технологии улучшения эксплуатационных характеристик динамических газожидкостных теплоэнергетических установок при управляемом лазерном индуцировании регулируемых локальных конфигураций топологических микро- и наноструктур на внутренней металлической поверхности рабочих камер. Ч. 1 / Т. В. Рыжова [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 6. С. 517–535. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-517-535>

Technologies for Improving the Operational Characteristics of Dynamic Gas-Liquid Thermal Power Plants with Controlled Laser Induction of Adjustable Local Configurations of Topological Micro-and Nanostructures on the Internal Metal Surface of Working Chambers

Part 1

T. V. Ryzhova¹⁾, D. D. Tumarkina²⁾, D. N. Bukharov²⁾, V. D. Samishkin²⁾, A. F. Lelekova²⁾, M. M. Arakelyan³⁾, A. O. Kucherik²⁾, S. M. Arakelyan²⁾

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

²⁾Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletovs (Vladimir, Russian Federation),

³⁾Yerevan State University (Yerevan, Republic of Armenia)

Abstract. The study considers one of the areas of modern surface nano-engineering using technologies for controlled formation of topological coatings of a given configuration under laser action on various samples, taking into account approaches for complex nonlinear thermodynamic systems with the development of dynamic non-equilibrium processes. The proposed technologies are universal in nature and are very promising, in particular, for metallic materials in the working chambers of thermal power plants. At the same time, the emphasis is placed on new physical principles for changing the functional characteristics of the sample material with their optimization for specific operating conditions of the sample with the formation of 1D - 3D micro- and nanostructures, including dendritic type with fractal objects. Methods of controlled laser synthesis of surface topological structures were used in different experimental schemes with laser ablation. These controlled processes are implemented on the surface of products without changing the volumetric characteristics of the material, unlike the technologies of its standard heat treatment, for example, to increase wear resistance. Specifically, the first part of the presented article deals with the fundamental problem of laser thermodynamics of the emergence of dendritic/fractal structures on the surface of a material under conditions of the development of non-stationary thermophysical processes. The emphasis is placed on stable surface states of the material during its specialized preliminary laser processing, including the synthesis of various inhomogeneous and multilayer configurations on the surface with a certain 3D topology. The possibilities of achieving the required characteristics of the material used in a controlled manner to improve the performance properties of various systems are discussed. In particular, this also applies to dynamic gas-liquid thermal power plants with controlled laser guidance of adjustable local configurations of topological mi-

cro- and nanostructures on the inner metal surface of their working chambers. As an experimental demonstration, the micro-cracked surface structure of metal-carbon materials was considered within the model of their graphitization

Keywords: improving the performance characteristics of thermal power plants, laser-induced micro- and nanostructures of the required configuration, metal-carbon complexes, entropy of a surface with inhomogeneities, modeling of dendrites, amplification of the electric field on inhomogeneities

For citation: Ryzhova T. V., Tumarkina D. D., Bukharov D. N., Samishkin V. D., Lelekova A. F., Arakelian M. M., Kucherik A. O., Arakelyan S. M. (2025) Technologies for Improving the Operational Characteristics of Dynamic Gas-Liquid Thermal Power Plants with Controlled Laser Induction of Adjustable Local Configurations of Topological Micro-and Nanostructures on the Internal Metal Surface of Working Chambers. Part 1. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (6), 517–535. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-517-535> (in Russian)

Введение

Проблема разработки научных подходов и методов при исследовании функциональных характеристик различных материалов и их модификации в заданном направлении для оптимизации в условиях использования в определенных высокотехнологичных секторах промышленности, включая требуемую структуризацию внешних и замкнутых внутренних поверхностей ряда устройств, в том числе и энергетического обеспечения, является ключевой в современном материаловедении. В эксплуатационном аспекте с замкнутыми циклами широкого класса прикладных задач для локализованных систем, например в разномасштабных устройствах и камерах с изменяющимися теплофизическими процессами в них, принципиальное значение имеет состояние поверхности, с которой непосредственно контактирует окружающая среда, включая рабочие вещества реализуемого технологического процесса.

Здесь решающее значение имеют специфические явления, определяемые процессами технической термодинамики в поверхностных слоях. Именно поверхностное состояние материала при соответствующей его предварительной обработке, включая синтез различных неоднородных и многослойных конфигураций на поверхности с определенной 3D-топологией, позволяет осуществлять реализацию комплексных технологических задач при эксплуатации изделий в разных режимах.

Важно подчеркнуть, что подобные формируемые поверхностные структуры являются универсальными в аспекте процедуры их создания с разработанной некоторой маршрутной технологической картой. Она должна основываться на необходимом научно-техническом обосновании с учетом специфических условий реализуемых процессов и выбираемых режимов работы изделий. Принципиальное значение здесь имеет достижение регулируемым способом необходимых характеристик используемого материала для них. Это требует при соответствующих подходах выявлять управляющие параметры для разрабатываемых методик и технологий с целью предварительной поверхностной обработки изделий. Особое значение имеет формирование на поверхности локализованных состояний в каждой

пространственной зоне обработки, когда речь идет о неоднородных поверхностных структурах с заданными параметрами для управления функциональными характеристиками комплексных объектов.

Данные топологические характеристики могут считаться необходимыми по разным причинам – как по конкретным условиям эксплуатации изделия, так и для расширения и получения новых возможностей при разработке элементов и систем на новых физико-технических принципах. В последнем случае должны быть проанализированы фундаментальные процессы, лежащие в основе подобного топологического материаловедения с цифровым моделированием.

На первом этапе рассмотрим эту проблему на примере поверхностной трансформации материала с топологическими структурами определенной конфигурации простых плоских образцов в рамках ряда моделей. Что касается специфики тех конкретных изделий, для которых данные разработанные технологии могут быть применены в соответствующих условиях их эксплуатации, то они не будут являться предметом данного анализа.

В представляемой статье эти вопросы исследованы в рамках достаточно общих форматов лазерной термодинамики при воздействии лазерного излучения на материал. Они являются дальнейшим развитием соответствующей процедуры анализа и предсказательного моделирования на основе фрактального подхода, изложенного нами, в частности, в работах [1, 2]. Это позволило получить новые принципиальные результаты в такой перспективной области, какой является топологическое цифровое материаловедение с управляемым достижением в лазерном термодинамическом эксперименте требуемых функциональных характеристик поверхности [3–6].

Речь идет о дендритных структурах фрактального типа и дефектах разного класса с регулируемой топологией при их синтезе в условиях лазерной абляции с поверхности материала с управляемым образом получаемыми неоднородными конфигурациями [3–5]. Сам теплофизический механизм возникновения дендритных структур связан с двухэтапным процессом сначала подплавления из-за нагрева при тепловом воздействии лазерного излучения (до температуры не более доли 0,7 от истинной температуры плавления материала), а затем – последующего остывания, которые реализуются за разные времена в определенных режимах воздействия на материалы лазерным пучком [7]. При таких процессах становится возможной модификация ряда функциональных характеристик образцов благодаря возникающим локализованным состояниям в металлических комплексах (например, с низкоуглеродистой сталью AISI 304), включая высокоэнтропийные сплавы, а также металлоуглеродные и алмазоподобные соединения и полупроводниковые материалы (перовскиты).

Некоторые научно-методические подходы с соответствующим компьютерным моделированием при решении данных проблем на путях топологической лазерной термодинамики для ряда этих материалов кратко представлены в настоящей статье при воздействии лазерного излучения на их поверхность в лазерном эксперименте, но в основном речь будет идти

о рассмотрении электрофизики в таких структурах разного элементного/структурного состава.

Лазерная термодинамика возникновения дендритных структур на поверхности материала

Теплофизические процессы. Как известно, при облучении лазерным излучением твердого кристаллического тела при микроскопическом рассмотрении происходит взаимодействие квантов света, электронов электронного газа и ионов решеточных структур, а также дефектов различной природы [8]. Процесс выравнивания температуры в такой системе с электрон-фононным взаимодействием происходит за время порядка наносекунд при плотности потока лазерного излучения до $10^6 \text{ Вт}/\text{см}^2$ с миллисекундной длительностью импульса [9]. И только для длительностей меньших наносекундных лазерных импульсов можно говорить о заметной разности температур между решеточной структурой и электронами, доходящей до тысяч градусов [10].

В наших экспериментах реализовывался первый случай, поэтому рассматривался локальный нагрев из-за поглощения излучения средой в лазерном пучке (для простоты – Гауссова профиля). Происходящий процесс обычной теплопроводности, как правило, в лазерном эксперименте считается нелинейным и нестационарным. При этом происходят явления рассеивания теплоты при проникновении излучения внутрь среды из-за отражения на ее поверхности и испарения вещества. Кроме того, в атмосфере необходимо учитывать потери теплоты на образование окисной пленки на поверхности, изменяющей функциональные свойства образцов. Таким образом, количественный анализ таких процессов является довольно сложной задачей.

Однако оценочно можно считать, что, например, для металлоконтактирующих материалов глубина проникновения теплоты в массивный образец составляет величину $\approx 50 \text{ мкн}$ [11]. В таком тонком слое поле распределения температуры, очевидно, определяется радиусом светового пятна на поверхности образца и длительностью лазерного импульса. При сканировании лазерного пучка по поверхности образца речь должна идти о модели с движущимся источником теплоты, которая может приводить к поверхностной аморфизации и сглаживанию существующих микронеоднородностей [12].

При используемой нами лазерной абляции образовавшаяся жидккая фаза выбрасывается с поверхности. Это можно рассматривать по аналогии с процессом газодинамического испарения с высокой эффективностью. Данное явление представляется как нестационарный гидродинамический процесс с определенной скоростью движения границы фазового перехода твердое тело – жидкость, которая может демонстрировать экспоненциальный рост со взрывным характером (ср. с [13]) с деформированием поверхности с учетом давления отдачи.

При формировании ванны расплава нас будет интересовать образование разной ориентации дендритных объектов с фрактальной структурой на по-

верхности материала в результате произошедшей неоднородной лазерной абляции и последовательных процессов нагрева–охлаждения. Необходим также учет взаимодействия падающего лазерного излучения с веществом при его выбросе в окружающее пространство при абляции с происходящими физико-химическими процессами в таком облаке. Возникающие в результате этих эффектов на поверхности мелкоигольчатые структуры (с наличием мартенсита и остаточного аустенита для металлических материалов) определяются большими скоростями нагрева и охлаждения в зависимости от режимов при лазерном облучении с происходящей неравномерностью процесса кристаллизации (ср. с [8]). Данные нестационарные процессы составляют отдельное направление исследований при получении материалов с заданными поверхностными свойствами и осаждении на поверхность разных веществ (в том числе и углеродных соединений) – так называемое плакирование.

Рассмотрим эту проблему в достаточно общем термодинамическом представлении (эксперименты нами проводились с нержавеющей низкоуглеродистой сталью AISI 304). Для этого необходимо рассчитать потери теплоты при воздействии, например, непрерывного лазерного излучения. Его энергию Q примем равной 10 Дж (в эксперименте использовали именно такое ее значение) при нагреве, для примера, нержавеющей стали. При учете потерь энергии при облучении образца на тепловое рассеяние Q' приходим к значению энергии ионной решетки с образовавшимся дендритом $Q - Q'$.

Данная процедура расчета проведена ниже на основе известных соотношений (например, [14, 15]) $Q' = - \int \lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF dt$, где Q' – потери на тепловое рассеяние; λ – коэффициент теплопроводности; ∂t – изменение температуры поверхности; ∂n – единичный вектор нормали к поверхности; dF – элемент поверхности; $d\tau$ – дифференциал по времени.

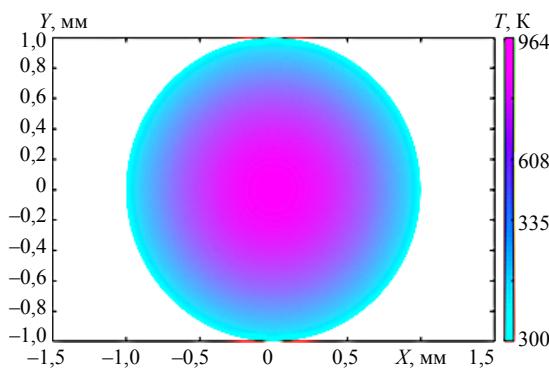
Если рассматривать композит в рамках стандартной модели электронного газа, то $\lambda = \frac{1}{3} v l C_v$, где v – средняя скорость теплового движения свободных электронов (с зарядом e и массой m); l – длина свободного пробега для электронов (берем ее приближенно равной параметру элементарной ячейки кристаллического тела – кубическая решетка с постоянной решетки $a = 3,4 \cdot 10^{-6}$ м); C_v – изохорная теплоемкость единицы электронного газа.

Скорость рассеяния энергии v находим из сравнения следующих двух соотношений [14, 15] для удельной электропроводимости: $\sigma = \frac{n_e e^2 l}{m v}$ и $\sigma = \frac{\lambda}{\frac{3}{2} (k/e)^2 T} = \frac{\frac{1}{3} v l C_v}{\frac{3}{2} (k/e)^2 T}$, где k – постоянная Больцмана; T – температура нагрева металла.

Следовательно, учитывая, что $C_v = \frac{3}{2} n_e k$, имеем $\nu = \sqrt{\frac{3kT}{m_e}}$, где n_e – плотность числа электронов.

Тогда для n_e получаем: $n_e \approx 2,04 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$. Здесь учитываем распределение электронов по ячейкам Хунда: у железа (4S14P3) – 4 свободных электрона, у углерода – тоже 4 свободных электрона (2S22P6); объем элементарной ячейки $3,93 \cdot 10^{-17} \text{ м}^3$.

Изменение температуры в области формирования дендритов на поверхности образца при лазерном нагреве (оценка дает значение 608 К) по отношению к комнатной температуре (300 К) составляет разницу $608 \text{ K} - 300 \text{ K} = 308 \text{ K}$. Все теплофизические расчеты сделаны согласно модели распределения температуры вдоль поверхности, полученной в среде Matlab Laser Toolbox [16], и наглядная картинка приведена на рис. 1 (ср. с [17]).



Rис. 1. График распределения температуры T на поверхности (координаты $X-Y$) нержавеющей стали при воздействии лазерного пучка радиусом 2,0 мм.

Показана область возникновения дендритов. Соответствующая температура указана цветом, и она зависит от времени лазерного облучения.

Приведенная сине-фиолетовая область – реализация синтеза дендритов

Fig.1. Temperature distribution graph T on the surface ($X-Y$ coordinates) of stainless steel under the influence of a laser beam with a radius of 2,0 mm. The area of dendrite formation is shown. The corresponding temperature is indicated by color, and it depends on the laser irradiation time.

The blue-violet area shown is the implementation of dendrite synthesis

Как видно из рис. 1, изменение радиуса области нагрева и формирование дендритов (сине-фиолетовый цвет – ср. с [18]) происходит в диапазоне примерно от 0,5 до 0,65 мм. При этом по времени процесса нагревания (время воздействия лазерного излучения) в лазерном пучке имеем: 1,0 мс соответствует достижению температуры 335 К; 1,5 мс – температуре 608 К; для времени лазерного облучения 3 мс имеем температуру 964 К; в центре лазерного пятна достигается температура 1121 К для времени облучения 4,5 мс.

Таким образом, получаем, что потери на тепловое рассеяние за 1 с ничтожны: $Q' \approx 3,67 \cdot 10^{-15} \text{ Дж}$, что приводит к энергии ионной решетки ма-

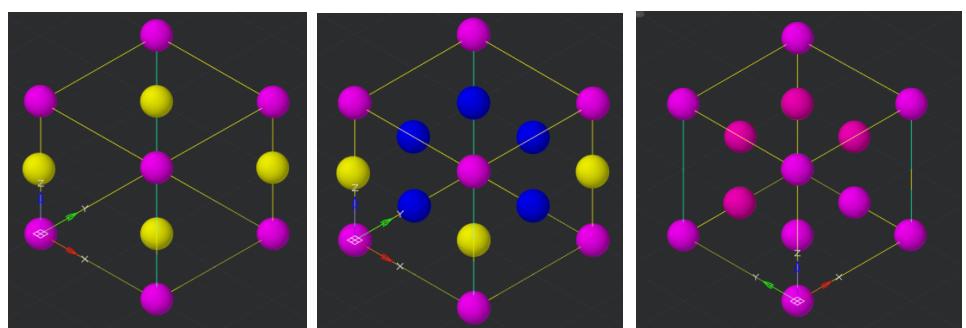
териала той же величины, что и энергия самого лазерного излучения $Q \approx 10$ Дж. Если говорить об интерпретации данного значения – это фактически энергетический параметр типа потенциальной энергии в системе.

Влияние точечных дефектов и параметров фракталов на величину энтропии дендритов. Рассмотрение проведем для определенности для перовскитов с точечными дефектами, которые в этом случае представляют собой примесные полупроводники.

Зафиксируем в качестве примера стехиометрическую формулу вещества в виде $\text{FeCr}_{0,6}\text{Ni}_{0,1}\text{Mn}_{0,3}\text{CO}_3$ [19], что соответствует структурному типу ABX_3 перовскита, обладающего высокой эффективностью фотопроводимости [20–21]. При приблизительно одинаковой концентрации составляющих элементов сплава он относится к высокоэнтропийным сплавам.

Равномерная концентрация атомов в кубической ячейке для элементного состава дендрита представляет собой перовскит с заполненными атомами углерода в тетраэдрических порах в серединах вертикальных ребер кристаллической структуры, что соответствует кубической объемно-центрированной ячейке [22, 23], как показано на рис. 2.

Согласно [24], термодинамическое фазовое состояние на поверхности образца после окисления будет представлять собой мартенсит, эволюция которого в зависимости от элементного состава приведена на рис. 2. Слева на рисунке показан мартенсит: в тетрагональных порах и в центрах верхней и нижней граней его кубической структуры – атомы углерода, в углах внутри и в центре – атомы железа, в центре – перовскит: в его тетрагональных порах находится углерод, железо – в углах, кислород – в центрах граней. Дополнительно в центрах кубических ячеек чередуются атомы никеля с вероятностью присутствия 0,1, атомы марганца – с вероятностью 0,3, атомы хрома – с вероятностью 0,6. Справа на рис. 2 показана нержавеющая сталь: в центре кубической ячейки находится углерод (его не видно в представленных 2D-проекциях), остальные шары в центрах граней и в углах – железо.



Rис. 2. Схемы кубической кристаллической структуры дендрита в рентгено-дифракционном представлении его состава. Желтый шар – атомы C, фиолетовый шар – Fe, синий шар – O. Слева направо представлены мартенсит, перовскит, нержавеющая сталь

Fig. 2. Schemes of the cubic crystal structure of dendrite in the X-ray diffraction representation of its composition. Yellow ball – C atoms, purple ball – Fe, blue ball – O.
 From left to right are martensite, perovskite, stainless steel

Теперь рассмотрим в общем виде влияние точечных дефектов и геометрических параметров фрактала на величину энтропии в подобных структурах.

В работе [25] представлен, например, фрактальный агрегат – рыхлая структура, состоящая из одинаковых частиц, причем ближайшие соседи частиц образуют химическую связь в зонах контакта. Эта фрактальная форма и будет использоваться нами для описания топологии дендритов.

Масса m_0 образовавшегося дендрита вычисляется очевидным способом

$$m_0 = \frac{k}{S} \sum_l \frac{k_l \mu_l}{n},$$

где k – постоянная Больцмана; k_l – число одинаковых атомов l -го элемента в химической формуле соединения; μ_l – молярная масса l -го элемента; S – поверхностная энтропия, равная 12,26 Дж/(моль · К), для данного состава сплава [26] параметр n взят нами из [27]: $n = (R/b)^D$, где D – фрактальная размерность (она равна в наших оценках 1,7); R – радиус сферы, описанной вокруг кубической ячейки; b – то же окружности вокруг фрактального агрегата.

Таким образом, управляемыми параметрами являются R/b для дендритов: через R определяется поверхностная площадь многогранника структуры (октаэдра) и b – площадь поверхности дендрита, которая хорошо аппроксимируется тетрагональной пирамидой (в нашей модели она в 2 раза меньше площади октаэдра).

Приведем некоторые численные оценки для рассматриваемого случая. Объем V пирамиды дендрита равен $27,67 \cdot 10^{-18}$ м³. Плотность среды находим из очевидного соотношения $\rho = \frac{m_0}{V}$, где V – объем дендрита; m_0 – масса дендрита. Тогда имеем: $m_0 = 5,88 \cdot 10^{-26}$ кг; $\rho = 2,12$ г/см³.

Плотность среды примерно соответствует плотности перовскита (2–4 г/см³). Таким образом, изначально, до начала процесса восстановления металла из композита, образуется структура кубического перовскита с заполненными тетрагональными порами.

Согласно [28], параметр кубической ячейки такой структуры находится из соотношения

$$a = \sqrt[3]{\frac{n\mu}{\rho k N_a}},$$

где n – число одинаковых атомов, приходящихся на элементарную ячейку; μ – молярная масса; ρ – плотность; k – число одинаковых атомов в химической формуле соединения; N_a – число Авогадро.

Для кубической ячейки рассматриваемого нами перовскита параметр a находится из соотношения

$$a = \sqrt[3]{\frac{\sum_l \mu_l}{\rho \sum_l k_l N_a}},$$

где l – число элементов, по которым идет суммирование.

Отсюда получаем, что параметр ячейки $a = 3,4$ мкм. Таким образом, приведенное простое рассмотрение позволяет оценить численные значения некоторых параметров для возникшей дендритной структуры.

Предложенные модели также позволяют произвести оценку размеров сформированных дендритов. Переходя к абсолютным размерам с учетом длины стороны ячейки используемой нами расчетной области 10 нм, получаем величины радиусов окружностей минимального покрытия для островковых дендритных структур порядка 100–400 нм. При этом оказалось, что локальная поверхностная энтропия s_i , следуя энтропийной процедуре, применяемой для сплавов [29], приводит к поверхностной интегрированной энтропии смешения s_{sm} с увеличением ее значения в среднем от 7 до 13 Дж/(моль · К), то есть появляются достаточно большие различия значений энтропии смешения на поверхности.

Размеры блоков закристаллизовавшегося металла после лазерной абляции составляют величину в несколько десятков нанометров, что на порядок меньше неоднородностей в исходном образце. Мы здесь не рассматриваем процессы плакирования для предварительно нанесенного на поверхность образца покрытия материала из сплавов с последующим его затвердеванием после быстрого охлаждения.

Микротрешиноватая структура поверхности металлоуглеродных материалов – модели графитизации и усиление электрического поля на локализованных дендритах

В аспекте образования металлоуглеродных соединений необходимо рассматривать вопросы синтеза карбидов на поверхности под воздействием лазерного излучения в атмосфере воздуха с углекислым газом; толщина такого слоя с измененной структурой карбида составляет величину в десятки микрон и может приводить к образованию пленок алмазов.

Достижение такого результата происходит в лазерных пучках с относительно скромными мощностными характеристиками в соответствующих схемах лазерной абляции [30]. Поскольку речь идет о вполне управляемых процессах, их можно рассматривать как один из инструментов для решения задач цифрового материаловедения с топологическими неоднородными структурами с экстремальными функциональными характеристиками на локальных неоднородностях дендритного/фрактального типов.

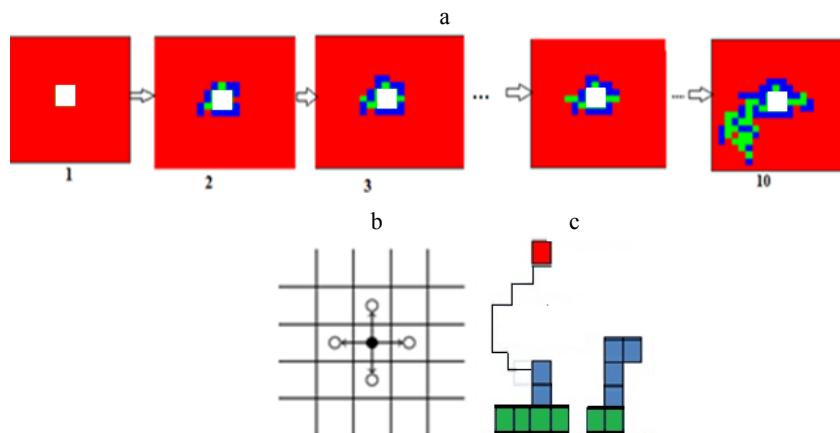
В общем случае явление подобной графитизации может быть объяснено в рамках лазерного формирования многочисленных «центров активации», покрывающих внутреннюю поверхность объекта с микротрецинами. Такой процесс удобно рассматривать в диффузионном приближении по механизму направленной перколяции [31–33], а саму систему возникающих на поверхности тела микротрецин – в рамках диффузионно-ограниченной агрегации (DLA) [34, 35].

Реализация указанных приближений проводилась на прямоугольной расчетной области с наложенной равномерной сеткой с расположеннымными в ячейках сети центрами активации, от которых начинала распространяться графитизированная область.

Модели перколяции и диффузионно-ограниченной агрегации реализовывались на основе клеточного автомата с окрестностью Неймана [36] (рис. 3).

Для построения области графитизации на основе модели перколяции рассматривался динамический процесс, в котором в данный момент времени ячейка расчетной области становится графитизированной с заданной вероятностью (p) с учетом того, что ее соседние ячейки уже сменили свое состояние на графитизированное. Эта величина вероятности (p) в относительном виде определяла величину области графитизации, зависящую от скорости движения фронта графитизации. Она зависела от прогрева системы, а значит, и от скорости движения каустики.

Система микротрецин моделировалась в приближении диффузионно-ограниченной агрегации (DLA), когда модельные частицы «дефекты» совершили случайные блуждания и с заданной вероятностью (s) агрегировали с ранее сформированной системой. Значение величины s определяло степень разветвленности системы трещин. С увеличением s трещины становились более разветвленными.



Rис. 3. Схемы модельных приближений: перколяционное (а), окрестность Неймана (б), DLA (в)

Fig. 3. Schemes of model approximations: percolation (a), Neumann neighborhood (b), DLA (c)

На рис. 4 приведены модели областей графитизации для изотермического поля температуры в случае варьирования вероятности графитизации p .

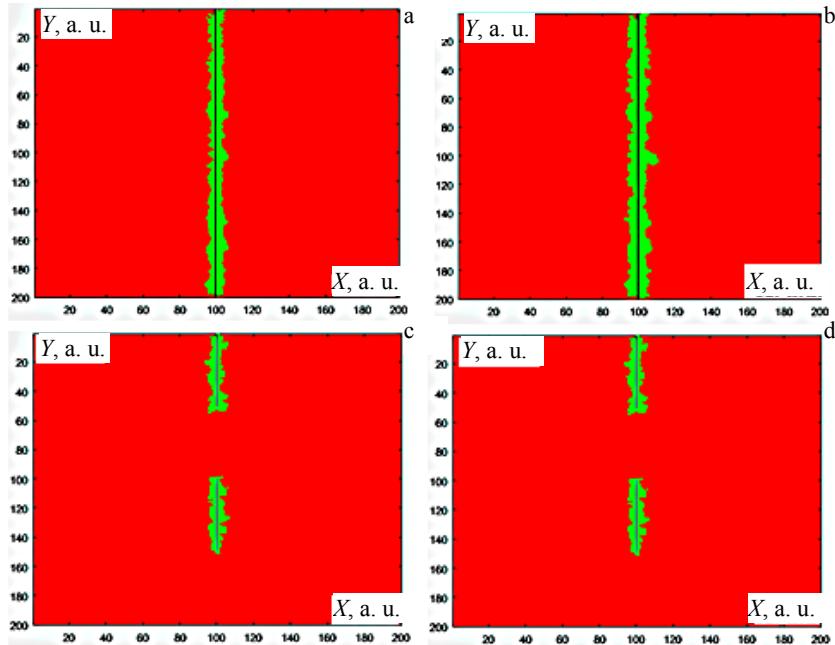


Рис. 4. Модели области графитизации для изотермического случая при:
 $p = 0,09$ от непрерывной прямой (а), $p = 0,11$ от непрерывной прямой (б),
 $p = 0,10$ от системы двух непересекающихся прямых (с),
 $p = 0,11$ от системы трещин в приближении DLA при $s = 0,9$ (д)

Fig. 4. Models of the graphitization region for the isothermal case at:
 $p = 0.09$ from a continuous straight line (a), $p = 0.11$ from a continuous straight line (b),
 $p = 0.1$ from a system of two disjoint straight lines (c),
 $p = 0.11$ from a crack system in the DLA approximation at $s = 0.9$ (d)

Полученные модели могут быть соотнесены с реальными структурами (рис. 5).

Разница моделей и реальных структур по фракタルным размерностям, рассчитанным методом box-counting [37], не превосходили величины 10^{-2} , что свидетельствовало о хорошей адекватности предложенного приближения.

Приведем кратко простые модельные оценки в рамках представлений о фрактальных островковых структурах с усилением электрического поля на подобных локализованных объектах. Рассмотрим напряженность электрического поля на острие изолированной фрактальной структуры в виде верти-

кального конуса как $E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^3} r$, где R – радиус острия. Положим,

что конец острия представлен шаром радиуса R . Тогда напряженность поля на острие можно оценить как $E_b(R) \sim \frac{1}{R^2}$ и усиление G поля будет

$$G = \frac{E_b}{E_f}, \text{ где } E_f \sim \frac{1}{R_f^2}; R_f \text{ – радиус окружности минимального покрытия [38].}$$

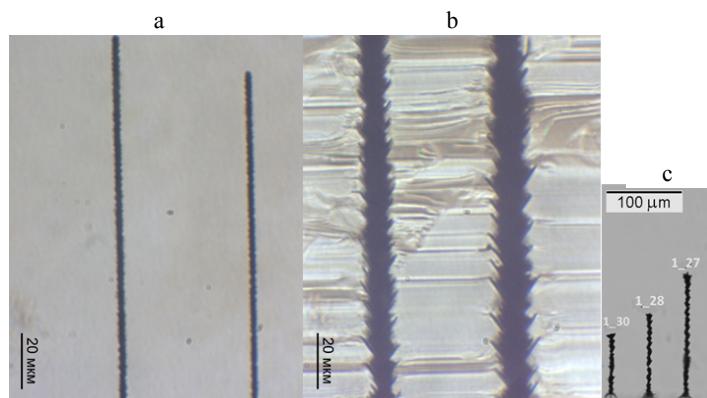


Рис. 5. Увеличенное оптическое изображение графитизированных нитей, созданных при использовании энергии лазерного импульса: а – низкой (0,3–0,4 мкДж); б – высокой (4,7–7,0 мкДж). Скорость варьирования фокуса оптического излучения по поверхности образца $v_a = 25$ мкм/с; частота следования лазерных импульсов $f = 1$ кГц; с – оптический снимок графитизированных нитей при энергии импульса 2,08 мкДж, созданных при варьировании скорости фокуса в диапазоне: $v_a = 1250$ мкм/с (отмечено как 1_30), $v_a = 1200$ мкм/с (отмечено как 1_28), $v_a = 1150$ мкм/с (отмечено как 1_27)

Fig. 5. Enlarged optical image of graphitized threads created using laser pulse energy: low (0.3–0.4 μ J) (a) and high (4.7–7.0 μ J) (b). The rate of variation of the optical radiation focus over the sample surface is $v_a = 25$ μ m/s; the laser pulse repetition frequency is $f = 1$ kHz; c – optical image of graphitized threads at a pulse energy of 2.08 μ J, created by varying the focal speed in the range of $v_a = 1250$ μ m/s (marked in Figure as 1_30), $v_a = 1200$ μ m/s (marked as 1_28), $v_a = 1150$ μ m/s (marked as 1_27)

Оценим относительное усиление электрического поля для латеральных фигур из рис. 6, когда относительный диаметр окружности минимального покрытия составлял значение 16 о. е.

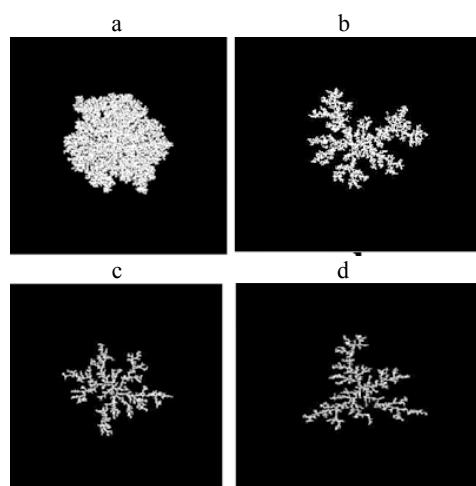


Рис. 6. Модельные изображения DLA-фрактальных структур островка, возникающих при величине вероятности s агрегации частиц: а – 0,01; б – 0,10; в – 0,50; г – 1,00

Fig. 6. Model images of DLA fractal island structures arising at particle aggregation probability s : a – 0.01; b – 0.10; c – 0.50; d – 1.00

В табл. 1 сведены расчетные значения по фрагментам конфигураций рис. 6 – для длинных ветвей, которыми назовем ветви, включающие в себя не менее трех элементов в относительных единицах. Под общим усилением понимается произведение усиления на одном конце, умноженного на число рассматриваемых фрактальных отростков.

Таблица 1
Оценка усиления на фрактальных структурах
Gain assessment on fractal structures

Обозначение рисунков	Число ветвей – длинных	Количество фрактальных отростков у длинных ветвей	Средний радиус отростков ветвей (о. е.)	Усиление на изолированном конце отростка длинной ветви	Общее усиление (от всех концов отростков)
a	3	6	1	64	384
b	7	22	0,5	256	$5,632 \cdot 10^3$
c	8	34	0,5	256	$8,704 \cdot 10^4$
d	14	45	0,5	256	$1,152 \cdot 10^4$

Таким образом, на модельных образцах можно добиться относительно-го усиления, составляющего величину порядка в 10^3 – 10^4 раз, учитывая только основные ветви. При рассмотрении всего периметра фигуры для разветвленных фракталов оценка приводит к относительному усилению порядка в 10^5 – 10^6 раз при умножении на число длинных ветвей.

Указанные численные значения основываются на модели, когда в зависимости от количества фрактальных отрезков происходит увеличение усиления. Для электропроводимости здесь можно говорить об аналогии с возрастанием тока при увеличении поперечного сечения проводника при прочих равных условиях.

ВЫВОДЫ

1. В статье рассмотрены методы оптимизации технологических параметров процесса лазерной послойной микро- и наномодификации поверхности с использованием разных схем лазерной аблации. Полученные результаты могут быть использованы в технологиях улучшения эксплуатационных характеристик динамических газожидкостных теплоэнергетических установок при управляемом лазерном индуцировании регулируемых локальных конфигураций топологических микро- иnanoструктур на внутренней металлической поверхности рабочих камер с учетом критериев прочности, износстойкости, точности воспроизведения их требуемых характеристик.

2. Представляемые технологии могут найти применение при улучшении функциональных характеристик различных деталей энергетических установок с помощью их лазерной обработки с нанесением послойной лазерной микро- и наномодификации поверхности, а также способствовать разработке лазерно-гибридных технологий универсального предназначения

с улучшением эксплуатационных характеристик при создании энергетических установок разного типа. С этой целью разработано математическое и программное обеспечение и реализованы демонстрационные экспериментальные исследования процесса послойной лазерной микро- и наномодификации поверхности ответственных деталей энергетических установок при использовании различных источников лазерного излучения с соответствующими пространственно-временными параметрами.

3. Полученные соответствующие экспериментальные результаты с предварительно индуцированными/нанесенными (наплавленными) структурами с лазерной послойной микро- и наномодификацией поверхности могут быть использованы в формате прототипов при разработке предложений и рекомендаций по реализации (коммерциализации) результатов данного исследования и вовлечения их в хозяйственный оборот.

Моделирование областей графитизации выполнено частично в рамках Государственного задания в области научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по научному проекту FZUN-2024-0018.

ЛИТЕРАТУРА

1. Динамические процессы развития трещиноватости фрактального типа: модели для твердотельного материала камеры энергетической установки в процессе ее эксплуатации / Т. В. Рыжова, Д. Н. Бухаров, М. М. Аракелян, С. М. Аракелян // Энергетика. Изв. высш.учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 2. С. 152–172. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-152-172>.
2. Самопроизвольное зарастание трещиноватости в рабочих камерах энергетических газожидкостных тепловых установок – диффузионные динамические процессы / Т. В. Рыжова, Д. Н. Бухаров, М. М. Аракелян, С. М. Аракелян // Энергетика. Изв. высш.учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 4. С. 345–362. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-345-362>.
3. Электрофизика углеродных 1D-структур, полученных в лазерном эксперименте: модели и демонстрация / С. В. Гарнов, Д. В. Абрамов, Д. Н. Бухаров [и др.] // Успехи физических наук. 2024. Т. 194, № 2. С. 115–137. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.12.039620>.
4. Synthesis of Allotropic Forms of Carbon in a Laser Experiment: 1D–3D Topological Configurations with Carbon Nanotubes and Diamond-Like Systems / K. S. Khorkov, D. N. Bukharov, Ya. V. Podoprigora [et al.] // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2024. Vol. 88. P. 2022–2033. <https://doi.org/10.1134/S1062873824708638>.
5. Bukharov, D. N. Nanocluster Fractal Electrical Conductivity in Thin Films on a Solid Surface: Dimensional Models of Different Configurations and Demonstration of Results in a Laser Experiment / D. N. Bukharov, A. O. Kucherik, S. M. Arakelian // Journal of Advanced Materials and Technologies. 2023. Vol. 8, No 3. P. 227–251. <https://doi.org/10.17277/jamt.2023.03.01.227-251>.
6. Technologies for Controlled Synthesis and Characteristics of Thin-Layer Topological Nanoobjects and Nanoclusters under Laser Irradiation on Solid Targets: Algorithms and Modeling, Quantum Bistability in 1D-Microstructures and Analogy with Carbon Nanotubes / D. N. Bukharov, T. A. Khudaybergenov, A. G. Tkachev, S. M. Arakelian // Journal of Advanced Materials and Technologies. 2024. Vol. 9, No 1. P. 60–74. <https://doi.org/10.17277/jamt.2024.01.060-074>.
7. Александров, Д. В. Дендритный рост с вынужденной конвекцией: методы анализа и экспериментальные тесты / Д. В. Александров, П. К. Галенко // Успехи физических наук. 2014. Т. 184, № 8. С. 833–850. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0184.201408b.0833>.

8. The Crossover between Tunnel and Hopping Conductivity in Granulated Films of Noble Metals / A. Kavokin, S. Kutrovskaya, A. Kucherik [et al.] // Superlattices and Microstructures. 2017. V. 111. P. 335–339. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2017.06.050>.
9. Электрические характеристики полимерных композитов, содержащих углеродные нанотрубки / А. В. Елецкий, А. А. Книжник, Б. В. Потапкин, Х. М. Кенни // Успехи физических наук. 2015. Т. 185, № 3. С. 225–270. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0185.201503a.0225>.
10. Bauhofer, W. A Review and Analysis of Electrical Percolation in Carbon Nanotube Polymer Composites / W. Bauhofer, J. Z. Kovacs // Composites Science and Technology. 2009. Vol. 69, No 10. P. 1486–1498. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.06.018>.
11. Елецкий, А. В. Транспортные свойства углеродных нанотрубок / А. В. Елецкий // Успехи физических наук. 2009. Т. 179, № 3. С. 225–242. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0179.200903a.0225>.
12. The Dominant Role of Tunneling in the Conductivity of Carbon Nanofiber Epoxy Composites / P. Cardoso, P. Cardoso, J. Silva, A. J. Paleo [et al.] // Physica Status Solidi (A). 2010. Vol. 207, No 2. P. 407–410. <https://doi.org/10.1002/pssa.200925334>.
13. Charge Transport and Tunneling in Single-Walled Carbon Nanotube Bundles / M. Salvato, M. Cirillo, M. Lucci [et al.] // Physical Review Letters. 2008. Vol. 101, No 24. P. 246804. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.246804>.
14. The Laser-Assisted Synthesis of Linear Carbon Chains Stabilized by Noble Metal Particle / A. O. Kucherik, A. V. Osipov, S. M. Arakelian [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1164. P. 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1164/1/012006>.
15. Forgerini, F. L. A Brief Review of Mathematical Models of Thin Film Growth and Surfaces: A Possible Route to Avoid Defects in Stents / F. L. Forgerini, R. Marchiori // Biomatter. 2014. Vol. 4, No 1. P. 28871. <https://doi.org/10.4161/biom.28871>.
16. Römer, G. R. B. E. Matlab Laser Toolbox / G. R. B. E. Römer, A. J. Huis in 't Veld // Physics Procedia. 2010. Vol. 5, Part B. P. 413–419. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.068>.
17. Самарский, А. А. Вычислительная термодинамика / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. М.: URSS, 2020. 784 с.
18. Бухаров, Д. Н. Термодиффузионная модель системы нанокластеров теллурида свинца / Д. Н. Бухаров // Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: сб. трудов XVIII Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Техно-Декор, 2023. С. 36–37.
19. Zuev, A. Yu. Defect Structure and Oxide Ion Transport in Sr- and Cr-doped LaCoO_{3-δ} / A. Yu. Zuev, A. I. Vylkov, D. S. Tsvetkov // Solid State Ionics. 2011. Vol. 192, No 1. P. 220–224. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2010.05.049>.
20. Low-Field Onset of Wannier-Stark Localization in a Polycrystalline Hybrid Organic Inorganic Perovskite / D. Berghoff, J. Bühlert, M. Bonn [et al.] // Nature Communications. 2021. Vol. 12, No 1. P. 5719. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26021-4>.
21. Frey, P. Realization of a Discrete Time Crystal on 57 Qubits of a Quantum Computer/ P. Frey, S. Rachel // Science Advances. 2022. Vol. 8, No 9. P. 7652. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abm7652>.
22. Preparation, Characterization, and Modeling of Carbon Nanofiber/Epoxy Nanocomposites / L.-H. Sun, Z. Ounaies, Zoubeida, X.-L. Gao [et al.] // Journal of Nanomaterials. 2011. Vol. 2011. Art. 307589. <https://doi.org/10.1155/2011/307589>.
23. Magomedov, M.N. On the Baric Fragmentation of a Crystal / M. N. Magomedov // Physics of the Solid State. 2003. Vol. 45, No 5. P. 953–956. <http://doi.org/10.1134/1.1575343>.
24. Laser-Induced Synthesis of Nanostructured Metal-Carbon Clusters and Complexes / S. Arakelian, S. Kutrovskaya, A. Kucherik [et al.] // Optical and Quantum Electronics. 2016. Vol. 48, No 11. Art. No 505. <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0776-7>.
25. Cannella, C. B. Carbyne Fiber Synthesis within Evaporating Metallic Liquid Carbon / C. B. Cannella, N. Goldman // The Journal of Physical Chemistry C. 2015. Vol. 119, No 37. P. 21605–21611. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b03781>.
26. Long Linear Carbon Chain – Laser-Induced Structures and Possible Applications / S. V. Kutrovskaya, S. M. Arakelian, A. O. Kucherik [et al.] // Laser Physics. 2019. Vol. 29, No 8. P. 085901. <http://doi.org/10.1088/1555-6611/ab183a>.
27. Two-Step Laser-Induced Synthesis of Linear Carbon Chains / A. O. Kucherik, S. M. Arakelian, S. V. Garnov [et al.] // Kvantovaya elektronika = Quantum Electronics. 2016. Vol. 46, No 7. P. 627–633. <http://doi.org/10.1070/QEL16128>.

28. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Изд. 5-е, стер. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. Т. V. Статистическая физика. Ч. 1. 616 с.
29. Поверхностная топология энтропии смешения в результате двухимпульсной лазерной аблации нержавеющей стали / Д. Д. Тумаркина, О. Я. Бутковский, А. В. Болачков, А. А. Бурцев // Физико-химические аспекты изучения кластеров,nanoструктур и наноматериалов. 2023. Вып. 15. С. 869–878. <http://doi.org/10.26456/pcascn/2023.15.869>.
30. Структура и физико-химические свойства наноструктурированных пленок оксидов металлов – чувствительного слоя газовых сенсоров / Т. В. Бельшева, А. К. Гатин, М. В. Гришин [и др.] // Химическая физика. 2015. Т. 34, № 9. С. 56. <https://doi.org/10.7868/S0207401X15090046>.
31. Eden Model Simulation of Re-Epithelialization and Angiogenesis of an Epidermal Wound / E. Aggingi, L. Wakabayashi, T. Wiandt, S. Maggelakis // Processes. 2018. Vol. 6, No 11. P. 207. <https://doi.org/10.3390/pr6110207>.
32. Москалев, П. В. Анализ структуры переколяционного кластера / П. В. Москалев // Журнал технической физики. 2009. Т. 79, № 6. С. 1–7.
33. Рыжикова, Ю. В. Фрактальные свойства самоорганизующихся дендритных структур / Ю. В. Рыжикова, С. Б. Рыжиков // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2018. №. 5. С. 1850401-1-1850401-7.
34. Mroczka, J. Algorithms and Methods for Analysis of the Optical Structure Factor of Fractal Aggregates/ J. Mroczka, M. Woźniak, F.R.A. Onofri// Metrology and Measurement Systems. 2012. Vol. 19, No 3. P. 459–470. <http://doi.org/10.2478/v10178-012-0039-2>.
35. Çağdaş, A., Diffusion Limited Aggregation via Python: Dendritic Structures and Algorithmic Art / A. Çağdaş, Y. Allahverdi // Journal of Scientific Reports-A. 2024. Vol. 58. P. 99–112. <https://doi.org/10.59313/jsr-a.1454389>.
36. Zaitsev, D. A. A Generalized Neighborhood for Cellular Automata / D. A. Zaitsev // Theoretical Computer Science. 2017. Vol. 666. P. 21–35. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2016.11.002>.
37. Ампилова, Н. Б. Алгоритмы фрактального анализа изображений / Н. Б. Ампилова, И. П. Соловьев // Компьютерные инструменты в образовании. 2012. № 2. С. 19–24.
38. Исмагилов, Р. Г. Электрическое поле вблизи проводящего остряя / Р. Г. Исмагилов // Технологии. Инновации. Связь: сб. материалов научно-практ. конф. СПб., 2022. С. 39–41.

Поступила 03.04.2025 Подписана в печать 02.09.2025 Опубликована онлайн 28.11.2025

REFERENCES

1. Ryzhova T. V., Bukharov D. N., Arakelyan M. M., Arakelyan S. M. (2024) Dynamic Processes of Development Jointing of a Fractal Type: Models for a Solid-State Material of the Chamber in a Power Facility during its Operation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (2), 152–172. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-152-172> (in Russian).
2. Ryzhova T. V., Bukharov D. N., Arakelian M. M., Arakelian S. M. (2024) Spontaneous Overgrowth of Jointing in the Working Chambers of Power Gas-Liquid Thermal Installations – Diffusion Dynamic Processes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (4), 345–362. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-345-362> (in Russian).
3. Garnov S. V., Abramov D. V., Bukharov D. N., Khudaiberganov T. A., Khor'kov K. S., Osipov A. V., Zhirnova S. V., Kucherik A. O., Arakelyan S. M. (2023). Electrophysics of 1D-Carbon Structures Obtained in a Laser Experiment: Models and Demonstration. *Physics-Uspekhi*, 67 (02), 109–128. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2023.12.039620>.
4. Khorkov K. S., Bukharov D. N., Podoprigora Ya. V., Burakova I. V., Burakov A. E., Kucherik A. O., Tkachev A. G., Arakelyan S. M. (2024) Synthesis of Allotropic Forms of Carbon in a Laser Experiment: 1D–3D Topological Configurations with Carbon Nanotubes

- and Diamond-Like Systems. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 88 (12), 2022–2033. <https://doi.org/10.1134/s1062873824708638>.
5. Bukharov D. N., Kucherik A. O., Arakelian S. M. (2023) Nanocluster Fractal Electrical Conductivity in Thin Films on a Solid Surface: Dimensional Models of Different Configurations and Demonstration of Results in a Laser Experiment. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 2023, 8 (3), 227–251. <https://doi.org/10.17277/jamt.2023.03.pp.227-251>.
 6. Bukharov D., Khudaiberganov T., Tkachev A., Arakelian S. (2024). Technologies for Controlled synthesis and Characteristics of Thin-Layer Topological Nanoobjects and Nanoclusters Under Laser Irradiation on Solid Targets: Algorithms and Modeling, Quantum Bistability in 1D-Microstructures and Analogy with Carbon Nanotubes. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 9 (1), 60–74. <https://doi.org/10.17277/jamt.2024.01.pp.060-074>.
 7. Alexandrov D. V., Galenko P. K. (2014) Dendrite Growth under Forced Convection: Analysis Methods and Experimental Tests. *Physics Uspekhi*, 57 (8), 771–786. <https://doi.org/10.3367/UFNe.0184.201408b.0833>.
 8. Kavokin A., Kutrovskaya S., Kucherik A., Osipov A., Vartanyan T., Arakelyan S. (2017) The Crossover Between Tunnel and Hopping Conductivity in Granulated Films of Noble Metals. *Superlattices and Microstructures*, 111, 335–339. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2017.06.050>.
 9. Eletskii A. V., Knizhnik A. A., Potapkin B. V., Kenny J. M. (2015) Electrical Characteristics of Carbon Nanotube Doped Composites. *Physics – Uspekhi*, 58 (3), 209–251. <https://doi.org/10.3367/UFNe.0185.201503a.0225>.
 10. Bauhofer W., Kovacs J. Z. (2009) A Review and Analysis of Electrical Percolation in Carbon Nanotube Polymer Composites. *Composites Science and Technology*, 69 (10), 1486–1498. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.06.018>.
 11. Eletsky A. V. (2009) Transport Properties of Carbon Nanotubes. *Physics – Uspekhi*, 52 (3), 209–224. <https://doi.org/10.3367/ufne.0179.200903a.0225>.
 12. Cardoso P., Silva J., Paleo A. J., van Hattum F. W. J., Simoes R., Lanceros-Méndez S. (2010) The Dominant Role of Tunneling in the Conductivity of Carbon Nanofiber Epoxy Composites. *Physica Status Solidi (a)*, 207 (2), 407–410. <https://doi.org/10.1002/pssa.200925334>.
 13. Salvato M., Cirillo M., Lucci M., Orlanducci S., Ottaviani I., Terranova M. L., Toschi F. (2008) Charge Transport and Tunneling in Single-Walled Carbon Nanotube Bundles. *Physical Review Letters*, 101 (24). <https://doi.org/10.1103/physrevlett.101.246804>.
 14. Kucherik A. O., Osipov A. V., Arakelian S. M., Garnov S. V., Povolotckaya A. V., Kutrovskaya S. V. (2019) The Laser-Assisted Synthesis of Linear Carbon Chains Stabilized by Noble Metal Particle. *Journal of Physics: Conference Series*, 1164, 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1164/1/012006>.
 15. Forgerini F. L., Marchiori R. (2014) A Brief Review of Mathematical Models of Thin Film Growth and Surfaces: A Possible Route to Avoid Defects in Stents. *Biomatter*, 2014. V. 4, No 1. P. 28871. <https://doi.org/10.4161/biom.28871>.
 16. Römer G. R. B. E., Huis in 't Veld A. J. (2010) Matlab Laser Toolbox. *Physics Procedia*, 5, Part B, 413–419. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.068>.
 17. Samarsky A. A., Vabishevich P. N. (2020) *Computational Thermodynamics*. Moscow, URSS Publ. 784 (in Russian).
 18. Bukharov D. N. (2023) Thermal Diffusion Model of a System of Lead Telluride Nanoclusters. *Nanoelektronika, nanofotonika i nelineinaya fizika: sb. trudov XVIII Vseros. konf. molodykh uchenykh* [Nanoelectronics, Nanophotonics and Nonlinear Physics: Collection of Works of the 18th All-Russian Conference of Young Scientists]. Saratov, Techno-Décor Publ. 227 (in Russian).
 19. Zuev A. Yu., Vylkov A. I., Tsvetkov D. S. (2011) Defect Structure and Oxide Ion Transport in Sr- and Cr-doped LaCoO_{3-δ}. *Solid State Ionics*, 192 (1), 220–224. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2010.05.049>.
 20. Berghoff D., Bühl J., Bonn M., Leitenstorfer A., Meier T., Kim H. (2021) Low-Field Onset of Wannier-Stark Localization in a Polycrystalline Hybrid Organic Inorganic Perovskite. *Nature Communications*, 12 (1). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26021-4>.
 21. Frey P., Rachel S. (2022) Realization of a Discrete Time Crystal on 57 Qubits of a Quantum Computer. *Science Advances*, 8 (9), 7652. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abm7652>.

22. Sun L.-H., Ounaies Z., Gao X.-L., Whalen C. A., Yang Z.-G. (2011) Preparation, Characterization, and Modeling of Carbon Nanofiber/Epoxy Nanocomposites. *Journal of Nanomaterials*, 2011, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2011/307589>.
23. Magomedov M. N. (2003) On the Baric Fragmentation of a Crystal. *Physics of the Solid State*, 45 (5), 953–956. <http://doi.org/10.1134/1.1575343>.
24. Arakelian S., Kutrovskaya S., Kucherik A., Osipov A., Povolotckaia A., Povolotskiy A., Manshina A. (2016) Laser-Induced Synthesis of Nanostructured Metal–Carbon Clusters and Complexes. *Optical and Quantum Electronics*, 48 (11), 505. <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0776-7>.
25. Cannella C. B., Goldman N. (2015) Carbyne Fiber Synthesis within Evaporating Metallic Liquid Carbon. *The Journal of Physical Chemistry C*, 119 (37), 21605–21611. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b03781>.
26. Kutrovskaya S. V., Arakelian S. M., Kucherik A. O., Osipov A. V., Garnov S. V. (2019) Long linear Carbon Chain–Laser-Induced Structures and Possible Applications. *Laser Physics*, 29 (8), 085901. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/ab183a>.
27. Kucherik A. O., Arakelian S. M., Garnov S. V., Kutrovskaya S. V., Nogtev D. S., Osipov A. V., Khor’kov K. S. (2016) Two-Stage Laser-Induced Synthesis of Linear Carbon Chains. *Quantum Electronics*, 46 (7), 627–633. <https://doi.org/10.1070/qel16128>.
28. Landau, L. D., Lifshits E. M. (2002) *Theoretical Physics. Vol. V. Statistical Physics*. Part. 1. 5th ed. Moscow, Fizmatlit Publ. 616 (in Russian).
29. Tumarkina D. D., Butkovskii O. Ya., Bolachkov A. V., Burtsev A. A. (2023) Surface Topology of Mixing Entropy After Two-Pulse Laser Ablation of Stainless Steel. *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klastEROV, nanostruktur i nanomaterialov* [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials], 15, 869–878. <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2023.15.869> (in Russian).
30. Belysheva T. V., Gatin A. K., Grishin M. V., Ikim M. I., Matyuk V. M., Sarvadii S. Y., Trakhtenberg L. I., Shub B. R. (2015) Structure and Physicochemical Properties of Nanostructured metal Oxide Films for Use as the Sensitive Layer in Gas Sensors. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 9 (5), 733–742. <https://doi.org/10.1134/S1990793115050048>.
31. Agyngi E., Wakabayashi L., Wiandt T., Maggelakis S. (2018) Eden Model Simulation of Re-Epithelialization and Angiogenesis of an Epidermal Wound. *Processes*, 6 (11), 207. <https://doi.org/10.3390/pr6110207>.
32. Moskalev P. V. (2009) Analysis of the Percolation Cluster Structure. *Technical Physics*, 54 (6), 763–769. <http://doi.org/10.1134/S1063784209060012>.
33. Ryzhikova Yu. V., Ryzhikov S. B. (2018) Fractal Properties of Self-Organizing Dendritic Structures. *Uchebnye Zapiski Fizicheskogo Fakulteta Moskovskogo Universiteta = Memoirs of the Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University*, (5), 1850401-1-1850401-7 (in Russian).
34. Mroczka J., Woźniak M., Onofri F. R. A. (2012) Algorithms and Methods for Analysis of the Optical Structure Factor of Fractal Aggregates. *Metrology and Measurement Systems*, 19 (3), 459–470. <http://doi.org/10.2478/v10178-012-0039-2>.
35. Çağdaş A., Allahverdi Y. (2024) Diffusion Limited Aggregation via Python: Dendritic Structures and Algorithmic Art. *Journal of Scientific Reports-A*, 58, 99–112. <https://doi.org/10.5931/jsr-a.1454389>.
36. Zaitsev D. A. (2017) A Generalized Neighborhood for Cellular Automata. *Theoretical Computer Science*, 666, 21–35. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2016.11.002>.
37. Ampilova N. B., Solovyov I. P. (2012) Algorithms for Fractal Image Analysis. *Kompyuternye Instrumenty v Obrazovanii = Computer Tools in Education Journal*, (2), 19–24 (in Russian).
38. Ismagilov R. G. (2022) Electric Field Near a Conductive Tip. *Tekhnologii. Innovatsii. Svyaz': sb. materialov nauchno-prakt. konf.* [Technology. Innovation. Communication: Collection of Materials of the Scientific and Practical Conference]. Saint Petersburg, 39–41 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-536-550>

УДК 621.6; 62.9; 697.9; 621.638

Анализ экспериментальных данных применения дегазационно-вентиляционного устройства при дегазации газгольдеров, содержащих низконапорный газ пропан

Е. А. Пехота¹⁾, В. Н. Романиук¹⁾

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

Реферат. В статье рассмотрены основные этапы проведенного исследования разработанной технологии дегазации, обеспечивающей энергоэффективность и экологичность производственного процесса. Представленный анализ содержит обоснование актуальности исследования в рамках действующего законодательства и требований промышленной безопасности при организации газоопасных работ и технической надежности газгольдеров. Отмечено, что сокращение затрат на выполнение дегазации является одной из приоритетных задач научного и прикладного характера, ввиду того что на этот процесс расходуются значительные энергоресурсы, применяются специально подготовленная вода для пара и сложное технологическое оборудование, требующее привлечения высококвалифицированных и специально обученных специалистов. Приведены основные технические характеристики и функциональное назначение элементов установки, описаны достоинства разработанного дегазационно-вентиляционного устройства ДВУ-ФС-1/450. На основе проведенного исследования определены наиболее эффективные эмпирические значения предельно допустимых концентраций и условия их достижения с учетом расчетов материального баланса. Обоснованы основные этапы дегазации газгольдера и математически определены зависимости продолжительности каждого из трех этапов с использованием математических расчетов. По результатам эксперимента произведена оценка ключевых стадий исследования, выполнен анализ полученных контрольных показателей, на основе которых проведены математические расчеты и моделирование процесса разработанной технологии дегазации газгольдера. Выявлена зависимость изменения концентрации кислорода в газовом пространстве газгольдера от времени дегазации и определена целесообразность ее учета при определении критериев качественной оценки процесса. Представлена полученная диаграмма изменения концентрации кислорода при дегазации газгольдера в зависимости от скорости ее снижения на разных этапах, которые в совокупности позволяют определить оптимальное время дегазации, выполнить экономические расчеты для оценки эффективности процесса. На основании представленных основных научных и технических результатов определены обоснованные критерии оценки получения экологичности производственной деятельности и низкого энергопотребления по сравнению с пропаркой в условиях подготовки технологического оборудования сжиженных углеводородных газов, эксплуатирующегося в среде пропана.

Ключевые слова: дегазация, газгольдер, сжиженный газ, пропан, процесс дегазации, вредные вещества, дегазационно-вентиляционное устройство, вентиляционный процесс, энергоэффективная дегазация

Для цитирования: Пехота, Е. А. Анализ экспериментальных данных применения дегазационно-вентиляционного устройства при дегазации газгольдеров, содержащих низконапорный газ пропан / Е. А. Пехота, В. Н. Романиук // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Т. 68, № 6. С. 536–550. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-536-550>

Адрес для переписки

Пехота Елена Александровна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 379-76-22
pehota@bntu.by

Address for correspondence

Pekhota Elena A.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 379-76-22
pehota@bntu.by

Analysis of Experimental Data on the Use of a Degassing and Ventilation Device for Degassing Gas Holders Containing Low-Pressure Propane Gas

E. A. Pekhota¹⁾, V. N. Romaniuk¹⁾

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

Abstract. The article discusses the main stages of the study of the developed degassing technology that ensures energy efficiency and environmental friendliness of the production process. The presented analysis substantiates the relevance of the study within the framework of the current legislation and industrial safety requirements for the organization of gas-hazardous works and the technical reliability of gas holders. It was noted that reducing the cost of degassing is one of the priority tasks of a scientific and applied nature, due to the fact that this process consumes significant energy resources, uses specially prepared water for steam and complex technological equipment that requires the involvement of highly qualified and specially trained specialists. The main technical characteristics and functional purpose of the unit elements are given, and the advantages of the developed degassing and ventilation device ДВУ-ФС[DVU-FS]-1/450 are described. On the basis of the study, the most effective empirical values of maximum permissible concentrations and the conditions for their achievement were determined, taking into account the calculations of the material balance. The main stages of gas tank degassing are substantiated and the dependencies of the duration of each of the three stages are mathematically determined using mathematical calculations. Based on the results of the experiment, the key stages of the study were evaluated, an analysis of the obtained control indicators was carried out, on the basis of which mathematical calculations and modeling of the process of the developed gas tank degassing technology were carried out. The dependence of the change in the oxygen concentration in the gas space of the gas holder on the time of degassing was revealed and the expediency of taking it into account when determining the criteria for the qualitative assessment of the process was determined. The obtained diagram of the change in oxygen concentration during degassing of a gas holder is presented, depending on the rate of its decrease at different stages, which together make it possible to determine the optimal degassing time and perform economic calculations to assess the efficiency of the process. Based on the presented main scientific and technical results, substantiated criteria for assessing the environmental friendliness of production activities and low energy consumption have been determined in comparison with steaming in the conditions of preparation of technological equipment for liquefied petroleum gases operating in a propane environment.

Keywords: degassing, liquefied gas, reduced gas, propane, degassing process, harmful substances, degassing and ventilation device, ventilation process, energy-efficient degassing

For citation: Pekhota E. A., Romaniuk V. N. (2025) Analysis of Experimental Data on the Use of a Degassing and Ventilation Device for Degassing Gas Holders Containing Low-Pressure Propane Gas. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (6), 536–550. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-536-550> (in Russian)

Введение

Согласно Закону Республики Беларусь «О промышленной безопасности» [1] и иным актам законодательства, в нашей стране необходимо обеспечивать при эксплуатации опасных производственных объектов опимальное состояние защищенности жизненно важных интересов личности и общества от возникновения аварий и инцидентов за счет комплекса организационных и технических мероприятий, реализуемых на предприятиях [2].

Вопросы дегазации оборудования и устройств, задействованных в газоснабжении, по своей общей совокупности принято относить к вопросам промышленной безопасности. Это в основном связано с производственной необходимостью применения метода дегазации как безусловного организационного процесса, необходимого в соответствии с действующими правилами организации безопасного производства работ в нефтяной, химической и газовой промышленности. При этом дегазация, или нейтрализация, как процесс означает принудительное удаление газообразных веществ на опасном производственном объекте до нормативных значений предельно допустимых вредных веществ в рабочей зоне.

Поскольку дегазация сосудов, работающих под давлением (газгольдеры, емкости аммиачно-холодильных установок, нефти, газа и т. п.), является важной задачей в контексте выполнения требований промышленной безопасности и обеспечения безаварийной работы взрывоопасного оборудования, их применение должно отвечать строгим стандартам, требованиям правил и рекомендациям, действующим в этой сфере производственной деятельности [1, 2]. В связи с этим особое внимание уделяется системам контроля и мониторинга, способным оперативно реагировать на изменения в техническом состоянии оборудования. Это позволяет минимизировать риски, связанные с утечками токсичных газов или образованием взрывоопасных смесей в рабочей зоне размещения сосудов, работающих под давлением. Также безопасность требует периодических освидетельствований и испытаний, технического обслуживания оборудования, расположенного во внутренней части емкости, и проведения технического диагностирования с применением неразрушающих методов контроля. Но без тщательной подготовки к газоопасным работам с применением дегазации перечисленные виды работ не допускаются.

Основным методом дегазации на производственных объектах в настоящее время является пропарка. Она заключается в подаче высокотемпературного пара с параметрами 120 °С и выше под давлением от 0,15 до 3 МПа, с разогревом внутренней поверхности в течение продолжительного времени (не менее четырех часов в зависимости от вместимости газгольдера, вида хранимого газообразного вещества и т. п.).

Сокращение затрат на выполнение дегазации является одной из приоритетных задач научного и прикладного характера, ввиду того что на этот процесс расходуются значительные энергоресурсы, применяются специально подготовленная вода для пара, сложное технологическое оборудование, требующее привлечения высококвалифицированных и специально обученных специалистов, обеспечивающих работу паровой установки. В то же время следует учитывать, что возникает необходимость в очистке или утилизации сконденсировавшихся после дегазации и загрязненных остатков, образующихся от зачистки внутренней поверхности. Объем загрязненных остатков может превышать 1000 л, и при этом в атмосферный воздух непрерывно в процессе дегазации выделяются вредные вещества.

Для снижения затрат и экологических последствий процесс дегазации требует разработки и применения научно обоснованных современных вентиляционно-дегазационных устройств и технологий, обеспечивающих безопасное удаление остаточных низконапорных газовоздушных смесей, аэрозолей и газов.

Успешная разработка и применение новых технологических процессов организации дегазации газгольдеров становится залогом не только снижения затрат на проведение работ по дегазации, но и защиты и сохранения техносферы и экосистемы в целом.

Таким образом, вопрос дегазации технологического оборудования, применяемого для хранения различных газов и химической продукции, следует рассматривать не только как метод устранения угрозы взрыва, но и как неотъемлемую часть комплексной системы управления производственными рисками и охраны окружающей среды. Важно учитывать, что не все виды дегазации одинаково эффективны в разных условиях. Например, в различных отраслях могут требоваться специфические подходы к дегазации, основанные на особенностях технологических процессов.

При этом ключевым аспектом является строгое соблюдение регламентов и норм безопасности, что предполагает наличие четко разработанных процедур дегазации. Правильная организация процессов дегазации не только снижает риски для окружающей среды и здоровья работников, но и позволяет значительно сократить потенциальные экономические потери и экологические налоговые сборы.

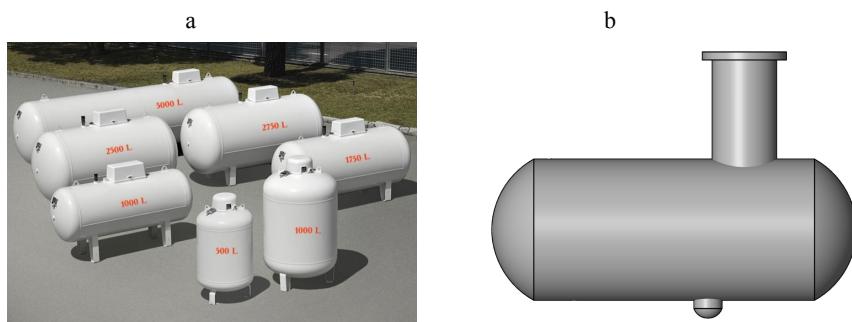
Для успешной разработки и реализации методов дегазации выполнен комплекс исследований нового разработанного производственного процесса и режимов дегазации с использованием специализированных технологий, оборудования, приспособлений и новейших материалов.

Разработка нового оборудования и методов дегазации должна обеспечивать энергетическую и экономическую эффективность, а также снижать воздействие на окружающую среду за счет сокращения выбросов вредных веществ при осуществлении данного процесса.

Актуальность использования горючих отходов

Анализ зарубежных наработок показал, что дегазация в основном осуществляется с применением различных жидкостных и безжидкостных методов, позволяющих удалять токсичные и взрывоопасные вещества физическими и механическими способами, включающими в том числе смывание токсинов с твердой поверхности струей воды, паром, потоком горячих газов, органическими растворителями или растворами поверхностно-активных веществ (ПАВ), связывание токсикантов, присутствующих, например, в воде, с помощью сорбентов; изоляцию поверхности путем дегазации инертными материалами. В отдельных случаях возможен процесс естественной дегазации, но он экономически не выгоден, так как занимает существенный период времени и простой специализированного оборудования.

Дегазация в газовой отрасли – реальная необходимость, так как при выполнении регламентных работ в эксплуатируемых газгольдерах всегда имеются в наличии неиспаряемые жидкые остатки и пирофорные отложения на внутренней поверхности. Причинами их образования являются разные факторы. В качестве неиспаряемых остатков могут выступать тяжелые фракции хранимых газопродуктов, которые остаются после переработки, или жидкий бутан, который со временем не способен переходить из жидкого состояния в газообразное. Причин этому может быть несколько, но основная – это применение одной емкости для хранения и транспортировки разных продуктов. Если перед заправкой сжиженными углеводородными газами (СУГ) резервуар газовоза или железнодорожной цистерны не был нормально очищен, в пропан-бутановую смесь вполне может попасть посторонняя фракция, которая в процессе слива, налива и эксплуатации газгольдера осаждет на дне, занимая полезный объем емкостей газохранилища. Поэтому дегазация для зачистки емкостей проводится с определенной периодичностью, как правило, не реже одного раза в два года.



Rис. 1. Газгольдеры, применяемые на опасных производственных объектах:

*а – вертикальные и горизонтальные с указанием объемов вместимости;
б – вид газгольдера, исследуемого в ходе эксперимента*

*Fig. 1. Gas holders used at hazardous production facilities:
a – vertical and horizontal gas holders with indicated capacity volumes;
b – type of gas holder studied during the experiment*

Традиционными способами дегазации в Республике Беларусь, применяемыми на опасных производственных объектах, являются: пропаривание (традиционное и импульсное); вентиляция (естественная и дефлекторная); принудительная вентиляция.

Учитывая, что основная цель – сокращение затрат на процесс дегазации, актуальными задачами являются исследование и разработка нового технологического процесса и конструкции оборудования, позволяющих наиболее эффективно осуществлять дегазацию с возможностью снижения затрат энергоресурсов и вредных выбросов в окружающую среду. Это является актуальным направлением, так как традиционные способы проведения дегазации не обеспечивают полный сбор и снижение выбросов низконапорного газа пропана и других вредных химических компонентов, содержащихся в отложениях газгольдеров. В связи с этим для достижения

цели выполнены исследования технологического процесса вентилирования внутренней поверхности газгольдеров.

Материалы исследования для обсуждения

Дегазируемый технологический аппарат (газгольдер), находящийся длительное время в эксплуатации, после опорожнения содержит пирофорные отложения на всей внутренней поверхности стенок, остаточные газы и мертвый остаток сжиженных тяжелых газов или веществ в виде индивидуальной жидкости, а также многокомпонентные углеводородные смеси в жидком состоянии (аэрозоли, конденсаты, жидкие пирофорные отложения и т. п.) [3].

Применяемые традиционные способы подготовки газгольдеров к техническому диагностированию и планово-предупредительным ремонтам относятся к взрыво- и пожароопасным работам. Основными видами опасности являются электризация технологических операций по очистке стенок внутренней поверхности (как правило, при пропарке и сливе остатков свободнопадающей струей) и взрывоопасность от искрообразования при очистке стенок от остатков, использовании костюмов и снаряжения, не имеющих электростатических нитей в структуре и др. [3, 4].

В соответствии с требованиями нормативных документов значение предельно допустимых концентраций (ПДК) можно определить по следующей формуле:

$$k_{\text{ПДК}} = \frac{k^{\text{НКП}}}{20}, \quad (1)$$

где $k_{\text{ПДК}}$ – предельно допустимая концентрация пропана, $\text{кг}/\text{м}^3$; $k^{\text{НКП}}$ – нижний концентрационный предел распространения пламени, $\text{кг}/\text{м}^3$ [3, 4].

Учитывая, что энергетические и материальные затраты на обработку газгольдеров паром существенные, а в процессе подготовки газгольдера с использованием пара возможно образование разрядов статического электричества вследствие множественного падения капель пароводяного конденсата, а также струйных ударов пара о технологические элементы конструкции, имеющиеся внутри газгольдера, нами допустимо определено, что снижение затрат достижимо с применением методов принудительного дегазационного вентилирования (ПДВ). ПДВ позволяет обеспечивать процесс дегазации с контролируемыми изменяемыми зависимыми переменными физико-химических параметров.

При разработке технологических методов, связанных со снижением воздействия химических веществ, в исследованиях на основании полученных данных проводятся разнообразные расчеты, обеспечивающие количественную оценку протекающих процессов с подбором реакционных взаимодействий, а также оптимальные значения параметров технологического процесса [4]. Во всех случаях при расчетах учитываются законы термо- и гидродинамики, тепло- и массопередачи, а также химической кинетики.

Поэтому для анализа и оценки необходимо выполнение расчетов, связанных с определением материального баланса.

Материальный баланс – это вещественное выражение закона сохранения массы вещества, согласно которому во всякой замкнутой системе масса веществ, вступивших во взаимодействие, равна массе веществ, образовавшихся в результате этого взаимодействия, т. е. приход вещества $\Sigma G_{\text{прих}}$ равен его расходу $\Sigma G_{\text{расх}}$. Таким образом, уравнение материального баланса можно представить в виде [4]

$$\Sigma G_{\text{прих}} = \Sigma G_{\text{расх}}. \quad (2)$$

Определение материального баланса позволяет не только учитывать входные потоки чистого атмосферного воздуха и выходные потоки смеси входящего чистого потока воздуха с дегазируемыми веществами, но и выявлять возможные утечки, неучтенные реакции и иные отклонения процесса. Анализ материального баланса необходим для оптимизации операций, что позволит определить направления, обеспечивающие в совокупности повышение эффективности дегазации низконапорного газа, находящегося в остаточном состоянии в газгольдере. Для расчета материального баланса используем законы стехиометрических соотношений [4], в соответствии с которыми общая масса всех поступающих в сосуд (реактор) материалов и веществ (приход) равна общей массе всех выходящих материалов и веществ (расходу), а также если известна масса хотя бы одного участника реакции, можно определить массы всех остальных, предварительно рассчитав их молярные массы.

Процесс дегазационного вентилирования технологического оборудования, применяемого на опасных производственных объектах, в общем виде можно описать дифференциальным уравнением материального баланса

$$Vdk_{\text{пп}} + qk_{\text{пп}}dt - qk_{\text{пв}}dt = Mdt, \quad (3)$$

где V – объем газгольдера, m^3 ; q – расход приточного воздуха в газгольдер при дегазации; $k_{\text{пп}}$ – контролируемая концентрация газообразных веществ во внутреннем пространстве газгольдера; $k_{\text{пв}}$ – то же газообразных веществ в приточном воздухе; M – интенсивность дегазации газгольдера, которая определяется экспериментально с учетом скорости подаваемого воздушного потока в условиях принудительной дегазации газгольдера; t – время, необходимое на полную дегазацию с доведением газгольдера до предельных значений ПДК, с.

Согласно действующим требованиям по дегазации газгольдеров для выполнения технического диагностирования, обслуживания и всех видов ремонта, регламентирующим в том числе процесс его освобождения (включая технологическое оборудование и приборы) от остатков («тяжелого» газа, пирофорных отложений и других взрывопожароопасных химических элементов) газообразных веществ, установлена остаточная загазован-

ность, определяемая приборным методом, которая составляет 0 % значения ПДК.

В ходе исследования процесса дегазации установлена одна из неизвестных значимых переменных – время t . Ее значение является одной из переменных и будет варьироваться в зависимости от организации процесса дегазации и характеристик применяемого и дегазируемого оборудования, а именно от:

- атмосферных условий (температуры газообразной среды, конденсатов, жидкой газовой фракции или «тяжелых» газов);
- технических характеристик применяемого вентиляционно-дегазационного оборудования (производительность, диаметр выходного патрубка и его длина, потребляемая мощность и т.п.);
- общего объема вместимости пропана и инженерной конструкции газгольдера (наличие внутренних трубопроводов, регазифицирующих устройств, отстойников-сборников, стационарных лестниц, сливных устройств и т. п. (рис. 1));
- расхода, давления воздушного потока и температуры, подаваемой в газгольдер приточного воздуха;
- химического состава и объемного количества, находящихся в нем остаточных фракций хранимого продукта и пирофорных отложений на внутренней поверхности.

В ходе проведенных исследований определено, что при дегазации газгольдера с жидким остатком пропана этот процесс протекает в несколько этапов, преимущественно отличающихся изменением концентрации вредных веществ в ходе дегазации до минимальных значений.

На этапе I интенсивность изменения концентрации паров паровой фазы в газгольдере существенна ввиду поступления в газгольдер потоков воздуха с большей плотностью с подаваемым атмосферным приточным воздухом.

На этапе II интенсивность изменения концентрации паров паровой фазы замедлилась и с малыми погрешностями устойчиво сохраняется (происходит уравновешивание плотности газовой среды и продолжается поддерживаться интенсификация испарения имеющихся жидких остатков и пирофорных отложений).

На этапе III интенсивность изменения концентрации паровой фазы значительно снижается.

Для определения времени процесса полной дегазации газгольдера до безопасной предельно допустимой концентрации вредных веществ в составе внутреннего объема необходимо рассчитать суммарную численность времени, затраченного на всех этапах дегазации газгольдера:

$$t_{\text{общ}} = t_1 + t_2 + t_3. \quad (4)$$

Продолжительность каждого этапа можно определить по формулам:

– для этапа I дегазации газгольдера с низконапорным газом пропаном

$$t_1 = \frac{V}{q} \ln \frac{M_1 - qk_0}{M_1 - qk_{02}}; \quad (5)$$

– для этапа II дегазации (при наличии однокомпонентного дегазируемого остатка газа пропана)

$$t_2 = \frac{G_0}{M_2}; \quad (6)$$

– для этапа II дегазации (при наличии многокомпонентного дегазируемого остатка в смеси пропана и пирофорных отложений)

$$t_2 = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{M_{\text{нач}}}{k_{02}(q - \alpha V)}; \quad (7)$$

– для этапа III дегазации газгольдера

$$t_3 = \frac{V}{q} \ln \frac{k_{03}}{k_{\text{без}}}, \quad (8)$$

где k_0 – первичная концентрация паровой фазы в газгольдере на начало дегазации, измеренная при вскрытии; k_{02} – промежуточная концентрация паровой фазы в начале второго этапа дегазации; k_{03} – то же паровой фазы в начале третьего этапа дегазации; $k_{\text{без}}$ – достигнутые показатели предельно допустимой концентрации при дегазации.

Исходя из полученных результатов эксперимента, определены значения интенсивности изменения концентрации остатков газа пропана и в смеси газов пропана с пирофорными отложениями. Обработка полученных экспериментальных данных показала, что в расчетах допускается принимать интенсивность дегазации относительно постоянной величины скорости подаваемого воздушного потока в условиях принудительной дегазации газгольдера в виде равенства

$$M = M_{\text{нач}} = M_1 = M_n. \quad (9)$$

Продолжительности процессов дегазации на этапе II для одно- и многокомпонентных дегазируемых веществ различны. Это обусловлено тем, что в отличие от однокомпонентных остатков у многокомпонентных дегазируемых веществ интенсивность испарения уменьшается во времени по экспоненциальной зависимости. Для многокомпонентного остатка дегазируемого вещества интенсивность испарения можно рассчитать по представленной формуле

$$M_n = M_{\text{нач}} \exp(-r_{k3} t), \quad (10)$$

где $M_{\text{нач}}$ – интенсивность испарения исходных остатков дегазируемых взрывоопасных веществ; r_{k3} – коэффициент корреляционной зависимости,

значение которого изменяется от физико-химических свойств дегазируемых остатков.

На рис. 2 приведен график изменения интенсивности концентрации паровой фазы пропана в дегазируемом газгольдере.

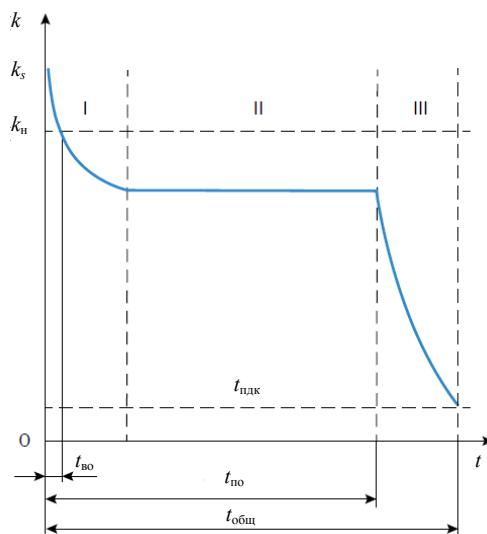


Рис. 2. График изменения интенсивности концентрации пропана в газгольдере:

$t_{\text{вз}}$ – продолжительность опасности взрыва; $t_{\text{пож}}$ – продолжительность опасности пожара;

$t_{\text{общ}}$ – общая продолжительность дегазации; k_n – нижний концентрационный предел паров вредных и взрывопожароопасных веществ, кг/м³; k_s – концентрация насыщенных паров вредных и взрывопожароопасных веществ при дегазации

Fig. 2. Graph of changes in the intensity of propane concentration in a gas tank:

$t_{\text{вз}}$ – duration of explosion hazard; $t_{\text{пож}}$ – duration of fire hazard;

$t_{\text{общ}}$ – total duration of degassing; k_n – lower concentration limit of vapors of hazardous and explosive substances, kg/m³; k_s – concentration of saturated vapors of hazardous and explosive substances during degassing

Для остатков пропана интенсивность испарения можно определить, используя формулу [3, 5–7]:

$$M = 10^{-6} \eta_i p_n \sqrt{\mu}, \quad (11)$$

где p_n – давление паровой фазы при нормированной температуре жидкой фазы в газгольдере; μ_i – коэффициент изменения испарения в зависимости от скорости и температуры воздушного потока над поверхностью, кПа; μ – молярная масса, кг·кмоль⁻¹.

Учитывая, что дегазация газгольдеров производится в целях подготовки к проведению газоопасных и огневых работ с допуском специализированного персонала внутрь емкости, необходимо обеспечить достижение 0 % содержания концентрации паров, а также нейтрализации отложений на внутрисменном пространстве и пирофорных соединениях [8–10].

В ходе экспериментов установлено, что переменно-динамичные режимы характеризуются изменением (повышением) температуры и интенсификацией за счет этого концентрации паров при дегазации. Увеличение

концентрации паров, выделяемых из жидких фракций при дегазации, обуславливает на определенных этапах снижение концентрации кислорода в газовом пространстве газгольдера. А по окончании процессов полной дегазации концентрация кислорода достигает предельных значений (концентрации кислорода в атмосферном воздухе). Таким образом, изменение зависимостей концентрации кислорода позволяет учитывать этот параметр в ходе экспериментов как показатель качества дегазации, ввиду того что правилами проведения газоопасных работ регламентируется периодическое измерение кислорода в рабочей зоне проведения работ с его обязательным содержанием не ниже 19 % [10–11].

Концентрацию кислорода в газовом пространстве газгольдера можно определять, используя формулу [12–13]:

$$k_{\text{кисл}} = 0,21 \frac{p_a - p_{\text{ж}}}{p_a}, \quad (12)$$

где p_a – атмосферное давление, Па; $p_{\text{ж}}$ – давление насыщенных паров хранившейся жидкости в газгольдере, Па.

Давление насыщенных паров жидкости определяется по уравнению Антуана, или по справочным или полученным экспериментальным данным:

$$p_{\text{ж}} = 133,3 \exp^{13,3036 - \frac{3816,44}{T - 46,13}}, \quad (13)$$

где T – температура газового пространства аппарата, К.

Изменение концентрации кислорода в ходе проведения экспериментов определялось в зависимости от времени дегазации и основных этапов ее проведения. На рис. 3 представлена диаграмма изменения концентрации кислорода в зависимости от времени дегазации и ее основных этапов.

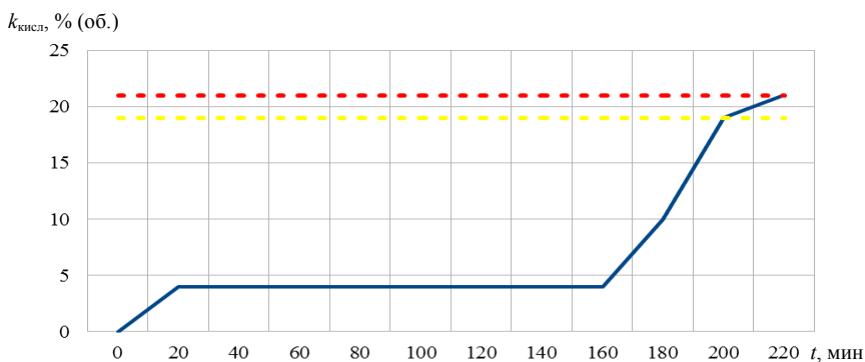
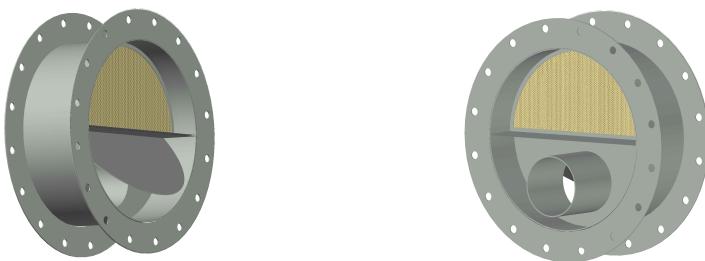


Рис. 3. Диаграмма изменения концентрации кислорода в зависимости от времени дегазации газгольдера

Fig. 3. Diagram of changes in oxygen concentration depending on the gas tank degassing time

На основании полученных данных проведенных экспериментов и выполненного анализа современных технологий и оборудования, приме-

няемых для дегазации и поддержания высокого уровня промышленной безопасности в газовой отрасли, разработано и изготовлено дегазационно-вентиляционное устройство ДВУ-ФС-1/450, вид и конструктивные элементы которого представлены на рис. 4.



Rис. 4. Вид дегазационно-вентиляционного устройства ДВУ-ФС-1/450, применяемого в ходе экспериментов на газгольдере [15]

Fig. 4. View of the DVU-FS [DVU-FS]-1/450 degassing and ventilation device, used during experiments on a gas tank [15]

Основные принципы, отраженные в разработанной конструкции с учетом особенностей применения и критериев обеспечения качества дегазации, следующие. В процессе дегазации газгольдера методом принудительной вентиляции используются приводные устройства – вентиляторы, оборудованные электромотором во взрывозащитном исполнении. Лопастная часть обязательно должна иметь в зоне вращения лопастей искрообразующий корпус, зона возможного соприкосновения лопастей изготавливается из латуни или могут применяться другие не образующие искр материалы. Для подачи атмосферного воздуха в газгольдер монтируются трубопроводы, причем их конструкция выполнена из искробезопасных материалов – брезента, ПВХ материала, бельтинга и т. п. [15].

Дегазационно-вентиляционное устройство ДВУ-ФС-1/450 для дегазации газгольдера позволяет [15]:

- осуществлять фильтрацию отходящего газовоздушного потока, создаваемого установкой с учетом аспектов экологичности и снижения взрывоопасности;
- производить подачу воздуха для дегазации через специальную крышку люка газгольдера, к которому подключается ДВУ-ФС-1/450 с воздухопроводами, что обеспечивает герметичность блока подачи и поступления воздуха по воздуховоду и контролируемость технологического процесса дегазации;
- выполнять подачу атмосферного воздуха на различных скоростях, начиная с 2 м/с, так как при дегазации необходимо постепенно формировать максимальный напор (зависит от концентрации паров в газгольдере).

В ходе предварительных исследований определено, что на скорости от 1 м/с и ниже дегазация газгольдера не должна осуществляться, так как наблюдается взрывоопасная концентрация веществ в системе отвода дегазационного устройства и внутри газгольдера в зоне скопления тяжелых остатков.

ВЫВОДЫ

1. Решение проблем повышения уровня безопасности выполнения газоопасных работ, энергоэффективности и их экологичности при дегазации газгольдеров обеспечивается детальным исследованием технологического процесса дегазации с определением критериальных зависимостей, выявление которых связано с изучением вентиляционных, тепло- и массообменных процессов в зоне ведения дегазационных работ.
2. Выявлены зависимости изменения концентрации кислорода в газовом пространстве газгольдера от времени дегазации и целесообразность ее учета при определении критериев качественной оценки процесса.
3. На основании полученных зависимостей произведена оценка трех ключевых фаз процесса дегазации газгольдера из-под пропана, а также выявлены основные критерии пограничных фазовых превращений, на основе которых произведены математические расчеты и моделирование процесса дегазации с применением разработанного дегазационно-вентиляционного устройства ДВУ-ФС-1/450.

ЛИТЕРАТУРА

1. О промышленной безопасности: Закон Респ. Беларусь от 5 янв. 2016 г. № 354-З // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=H11600354>.
2. Правила по обеспечению промышленной безопасности при добыче нефти и газа: постановление М-ва по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь от 22 нояб. 2013 г. № 55 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21328122p>.
3. Назаров, В. П. Методы и способы снижения пожаровзрывоопасности процессов дегазации нефтяных резервуаров / В. П. Назаров // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2019. № 1. С. 19–24.
4. Багманова, Р. Х. Материальные балансы химико-технологических процессов: методические указания для выполнения практических работ / Р. Х. Багманова, В. П. Дорожкин. Нижнекамск: Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) «КНИТУ», 2012. 73 с.
5. Категорирование помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности: ТКП 474–2013. Минск: М-во по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь, 2022. 55 с.
6. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: СН 4.02.03–2019. Взамен СНБ 4.02.01-03. Минск: Минстройархитектуры, 2025. 52 с.
7. Строительная климатология: СНБ 2.04.02–2000. Введ. 01.07.2001. Минск: Минстройархитектуры, 2001
8. Пехота, А. Н. Автомобильные топливные заправки на предприятиях. Организация и эксплуатация: практическое пособие / А. Н. Пехота. Гомель: БелГУТ, 2014. 214 с.
9. Назаров, В. П. Теоретические основы расчета пропарки резервуаров с остатками нефтепродуктов / В. П. Назаров, Д. Ц. Ратайчак // Исследование некоторых опасных факторов пожара: сб. тр. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1985. С. 22–32.
10. Analytical Modelling of the Water Block Phenomenon in Hydraulically Fractured Wells / S. Naik, S. Yang, P. Bedrikovetsky, M. Woolley // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2019. Vol. 67. P. 56–70. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.04.018>
11. Burlutskii, E. An Assessment of the Effectiveness of the Analytical Methods to Fracture Propagation Control Using Accurate Mathematical Modelling / E. Burlutskii // Journal of Natural

- Gas Science and Engineering. 2019. Vol. 62. P. 294–301. [https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.12.017/](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.12.017)
12. Гориченко, С. Ф. Развитие методологии технического диагностирования трубопроводов газораспределительной системы и анализ эффективности способов восстановления их работоспособности / С. Ф. Гориченко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 2. С. 154–174. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-68-2-154-174>.
 13. Фиксов, А. С. Метод расчета переходных процессов в газопроводе / А. С. Фиксов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 5. С. 446–458. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-446-458>.
 14. Пехота, Е. А. Повышение качества дегазации при подготовке газгольдеров к техническому диагностированию с применением дегазационно-вентиляционного устройства / Е. А. Пехота, В. Н. Романюк // Перспективные направления инновационного развития и подготовки кадров: сб. тез. Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 31 окт. – 02 ноя. 2024 г. Брест: БрГТУ, 2024. Ч. 1. С. 269–275.
 15. Пехота, Е. А. Обоснование создания дегазационно-вентиляционного устройства ДВУ-ФС-1/450 с целью обеспечения качества технического диагностирования газгольдеров / Е. А. Пехота, В. Н. Романюк, А. С. Таврель // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 17–18 окт. 2024 г. Минск: БНТУ, 2024. С. 91–94.
 16. Пехота, Е. А. Оценка и прогнозирование технического состояния стальных резервуаров, и технология их восстановления / Е. А. Пехота // Инновации в технических и экономических системах: сб. материалов VIII науч.-практ. конф. магистрантов / под общ. ред. А. А. Ерофеева. Гомель: БелГУТ, 2022. С. 71.
 17. Пехота, Е. А. Новые технологии в обеспечении эксплуатационной надежности резервуаров и экологической безопасности / Е. А. Пехота, А. А. Васильев, А. Н. Пехота // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания. ICEP-2022: сб. тр. V Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию кафедры природоустройства, Брест, 26–28 окт. 2022 г.: в 2 ч. / редкол. А. А. Волчек [и др.]; науч. ред. А. А. Волчек, О. П. Меньшик. Брест: БрГТУ, 2022. Ч. 2. С. 170–173.

Поступила 03.04.2025 Подписана в печать 02.09.2025 Опубликована онлайн 28.11.2025

REFERENCES

1. On Industrial Safety. Law of the Republic of Belarus dated January 5, 2016 No 354-Z. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=H11600354> (in Russian).
2. Rules for Ensuring Industrial Safety in Oil and Gas Production: approved by the Resolution of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus dated November 22, 2013 No 55. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21328122p> (in Russian).
3. Nazarov V. P. (2019) Methods and Ways to Reduce the Fire and Explosion Hazard During Oil Reservoir Degassing Processes. *Pozhary i chrezvychainye situatsii: predotvratshchenie, likvidatsiya = Fires and Emergencies: Prevention, Elimination*, (1), 19–24 (in Russian).
4. Bagmanova R. Kh., Dorozhkin V. P. (2012) *Material Balances of Chemical and Technological Processes*. Nizhnekamsk, Nizhnekamsk Chemical Technology Institute (branch) Kazan National Research Technological Universiyu (in Russian).
5. TKP [Technical Code of Common Practice] 474-2013. *Categorization of Premises, Buildings, and Outdoor Installations According to Explosion Fire and Fire Hazard*. Minsk, Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, 2022 (in Russian).
6. SN [Standard for Construction] 4.02.03–2019. *Heating, Ventilation, and Air Conditioning*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2025 (in Russian).

7. SNB [Construction Standards of the Republic of Belarus] 2.04.02–2000. Construction Climatology. Minsk, Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2001 (in Russian).
8. Pekhota A. N. (2014) *Automobile Fuel Stations at Enterprises. Organization and Operation.* Gomel, Belarusian State University of Transport. 214 (in Russian).
9. Nazarov V. P., Rataychak D. Ts. (1985) Theoretical Foundations for Calculating the Steaming of Reservoirs with Residual Oil Products. *Issledovanie nekotorykh opasnykh faktorov pozhara: sb. tr.* [Study of Some Hazardous Fire Factors: Collected Works]. Moscow, Higher Engineering Fire-Technical School of the USSR Ministry of Internal Affairs, 22–32 (in Russian).
10. Naik S., Yang S., Bedrikovetsky P., Woolley M. (2019) Analytical Modelling of the Water Block Phenomenon in Hydraulically Fractured Wells. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 67, 56–70. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.04.018>.
11. Burlutskii E. (2019) An Assessment of the Effectiveness of the Analytical Methods to Fracture Propagation Control Using Accurate Mathematical Modelling, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2019, 62, 294–301. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.12.017>.
12. Gorichenko S. F. (2025) Development of a Methodology for Technical Diagnostics of Pipelines of the Gas Distribution System and Analysis of the Effectiveness of Ways to Restore their Operability. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 68 (2), 154–174. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-68-2-154-174> (in Russian).
13. Fikov A. S. (2021) Method for Calculating Transients in a Gas Pipeline. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (5), 446–458. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-446-458> (in Russian).
14. Pekhota E. A., Romanyuk V. N. (2024) Improving the Quality of Degassing in the Preparation of Gas Holders for Technical Diagnostics Using Degassing and Ventilation Device. *Perspektivnye napravleniya innovatsionnogo razvitiya i podgotovki kadrov: sb. tez. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.*, Brest, 31 okt. – 02 noya. 2024 g. Ch. 1 [Promising Areas of Innovative Development and Personnel Training: International Scientific Practical Conference, Brest, October 31 – November 02, 2024. Part. 1]. Brest, Brest State Technical University, 269–275 (in Russian).
15. Pekhota E. A., Romanyuk V. N., Tavrel A. S. (2024) Justification for the Creation of the DVU-FS-1/450 Degassing and Ventilation Device in order to Ensure the Quality of Technical Diagnostics of Gas Holders. *Innovatsionnye tekhnologii v vodnom, kommunal'nom khozyaistve i vodnom transporte: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.*, Minsk, 17–18 okt. 2024 g. [Innovative Technologies in Water, Public Utilities and Water Transport: International Scientific and Technical Conference, Minsk, October 17–18, 2024]. Minsk, Belarusian National Technical University, 91–94 (in Russian).
16. Pekhota E. A. (2022) Assessment and Forecasting of the Technical Condition of Steel Tanks, and Technology for Their Restoration. *Innovatsii v tekhnicheskikh i ekonomicheskikh sistemakh: sb. materialov VIII nauch.-prakt. konf. magistrantov* [Innovations in Technical and Economic Systems: Collection of Materials of the 8th Scientific and Practical Conference of Master's Students]. Gomel, Belarusian State University of Transport, 71 (in Russian).
17. Pekhota E. A., Vasilyev A. A., Pekhota A. N. (2022) New Technologies to Ensure Operational Reliability of Tanks and Environmental Safety. *Aktual'nye nauchno-tehnicheskie i ekologicheskie problemy sokhraneniya sredy obitaniya. ICEP – 2022: sb. tr. V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 50-letiyu kafedry prirodoustroistva*, Brest, 26–28 okt. 2022 g. Ch. 2. [Current Scientific, Technical and Environmental Issues of Habitat Conservation. Collected Works of the 5th International Scientific and Practical Conference, dedicated to the 50th Anniversary of the Department of Nature Management, Brest, October 26–28, 2022. Part 2]. Brest, Brest State Technical University, 170–173 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-551-564>

УДК 621.383; 581.582:574.23

Залив Кара-Богаз-Гол как «солнечный пруд» и его энергетические характеристики

А. М. Пенджиев¹⁾, Б. М. Мамедов¹⁾

¹⁾Туркменский государственный архитектурно-строительный институт
(Ашхабад, Туркменистан)

Реферат. В статье рассмотрены солнечные энергетические ресурсы залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда». С использованием разработанных физических и математических методов определены его тепловые энергетические потенциалы аккумулирования солевых отложений залива для создания и использования энергетических технологий в отраслях промышленности. Оценены тепловые энергетические характеристики для внедрения различных солнечных энергетических аккумулирующих технологий. По предварительным расчетам, КПД солнечного водоема составляет зимой 1,14 %, летом 1,46 %. Солнечный энергетический потенциал преобразования в тепловую энергию меняется в пределах от 40 до 70 % в зависимости от сезона года. Средняя температура на солевой поверхности дна водоема составляет: в летний период – от 55,04 до 79,8 °C, в зимний – от 20,0 до 25,6 °C. Полученные научные результаты могут быть использованы при разработке проектно-сметной документации, составлении технико-экономического обоснования для создания различных солнечно-энергетических технологических комплексов в зоне Каспийского региона, которые будут содействовать укреплению энергетической безопасности, развитию энергетических систем и производству автономных технологических установок, оборудования на основе солнечной энергии, что снизит энергопотребление органического топлива и улучшит экологическую обстановку в регионе Кара-Богаз-Гола.

Ключевые слова: солнечная энергетика, энергетические потенциалы, солнечный пруд, гидрометеорологические особенности, математическая статистика, залив Кара-Богаз-Гол, Каспийское море, Туркменистан

Для цитирования: Пенджиев, А. М. Залив Кара-Богаз-Гол как «солнечный пруд» и его энергетические характеристики / А. М. Пенджиев, Б. М. Мамедов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Т. 68, № 6. С. 551–564. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-551-564>

Kara-Bogaz-Gol Bay as a “Solar Pond” and Its Energy Characteristics

А. М. Penjiyev¹⁾, Б. М. Mamedov¹⁾

¹⁾ Turkmen State Institute of Architecture and Civil Engineering, (Ashgabat, Turkmenistan)

Abstract. The article considers the solar energy resources of the Kara-Bogaz-Gol Bay as a “solar pond”. Using the developed physical and mathematical methods, the thermal energy potentials

Адрес для переписки

Пенджиев Ахмет Мырадович
Туркменский государственный
архитектурно-строительный институт
ул. Б. Аннанова, д. 136,
744001, г. Ашхабад, Туркменистан
Тел.: +7 (993) 65-80-17-54
ampenjiyev@gmail.com

Address for correspondence

Penjiyev Ahmet M.
Turkmen State Institute
of Architecture and Construction
136, B. Annanova str.,
744001, Ashgabat, Turkmenistan
Tel.: +7 (993) 65-80-17-54
ampenjiyev@gmail.com

of the accumulation of salt deposits in the bay were determined for the creation and use of energy technologies in industrial sectors. Thermal energy characteristics for the introduction of various solar energy storage technologies were assessed; according to preliminary calculations, the efficiency of a solar reservoir is 1.14 % in winter and 1.46 % in summer. The solar energy potential of conversion into thermal energy varies from 40 to 70 % depending on the season of the year. The average temperature on the salt surface of the reservoir bottom in summer ranges from 55.04 to 79.8 °C, in winter from 20.0 to 25.6 °C. The obtained scientific results can be used in the development of design and estimate documentation, preparation of feasibility studies for the creation of various solar energy technological complexes in the Caspian region, which will contribute to strengthening energy security, development of energy systems and production of autonomous technological installations and equipment based on solar energy, which will reduce the energy consumption of fossil fuels and improve the environmental situation in the Kara-Bogaz-Gol region.

Keywords: solar energy, energy potentials, solar pond, hydrometeorological features, mathematical statistics, Kara-Bogaz-Gol Bay, Caspian Sea, Turkmenistan

For citation: Penjyiev A. M., Mamedov B. M. (2025) Kara-Bogaz-Gol Bay as a “Solar Pond” and Its Energy Characteristics / *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (6), 551–564. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-551-564> (in Russian)

Введение

Для реализации государственных программ по энергосбережению, направленных на повышение энергоэффективности во всех отраслях экономики, конкурентоспособности национальной экономики, предусмотрены модернизация и техническое перевооружение предприятий, внедрение современных ресурсосберегающих технологий с использованием новейших научно-технических разработок, совершенствование систем учета потребления энергоресурсов и охраны окружающей среды [1–3].

Национальная стратегия по развитию возобновляемой энергетики в Туркменистане до 2030 г. предусматривает меры по использованию возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в электроэнергетике по направлениям развития – экспорт; местное потребление в рамках, согласованных с энергосистемами; электроснабжение потребителей в отдаленных районах страны.

Проведенный анализ используемых в мировой практике систем энерго- и теплоснабжения на основе ВИЭ показывает, что к наиболее перспективным технологиям для применения в Туркменистане относятся: энерго- и водоснабжение небольших рассредоточенных населенных пунктов и фермерских хозяйств; сеть «солнечных» водопойных пунктов на природных пастбищах Каракумов; ветровые и солнечные установки для энергоснабжения удаленных поселков от линии электропередачи; энергосберегающие «солнечные» дома для фермерских хозяйств; солнечные технологические системы отопления и горячего водоснабжения. Исходя из этого использование и применение в энергопроизводстве технологических систем, оборудования на основе ВИЭ является актуальной задачей [1–6].

Среди ВИЭ перспективным для Туркменистана является использование солнечной энергии. По расчетам, технический потенциал энергии Солнца эквивалентен $1,4 \cdot 10^9$ т у. т. в год. Одним из экзотических способов исполь-

зования солнечной энергии является «солнечный пруд». Соленый водоем – это солнечный коллектор, в котором аккумулируется значительное количество энергии Солнца [7, 8].

Многими учеными проделана определенная работа по изучению данного вопроса. В своих научных трудах авторы рассмотрели: дизайн и перспективы использования прудов; физику тепловых процессов неглубоких «солнечных прудов» (использование их для обогрева промышленных предприятий); анализировали переходной процесс в неглубоких прудах с применением солнечных водонагревательных коллекторов; определили выработку электроэнергии в солнечных прудах в штате Калифорния и др. [5–25].

Туркменскими учеными проведена большая научно-исследовательская работа и достигнуты значительные результаты по использованию солнечной энергии в народном хозяйстве. Вопросы аккумулирования энергии в соленом водоеме как источнике теплоты недостаточно исследованы, не сформулированы рекомендации по реализации освоения энергетических потенциалов как аккумулятора теплоты «солнечных прудов» в природно-климатических условиях Туркменистана, который обладает значительными возобновляемыми энергетическими ресурсными потенциалами. Для разработки и внедрения различных солнечно-энергетических технологий необходимо составить технико-экономическое обоснования (ТЭО) с целью обоснования целесообразности внедрения проекта. В приведенных работах энергетические ресурсные потенциалы залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда» в Каспийском море не рассмотрены [26, 27].

Залив Кара-Богаз-Гол богат химическими элементами для использования в различных отраслях промышленности, полученные энергетические ресурсные потенциалы повышают энергоэффективность химического производства, понизят энергозатраты, тем самым снизят себестоимость продукции, уменьшат вредные выбросы в биосферу, улучшат социально-бытовые, экономические и экологические условия жизнедеятельности населения. Основываясь на обзоре литературы, определены цели и задачи исследования залива Кара-Богаз-Гол как природного источника энергии «солнечный пруд».

Цель исследования – оценить ресурсные потенциалы солнечного излучения залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда» с целью использования и внедрения различных солнечных энергетических технологий для тепло- и энергосбережения в Каспийском регионе.

Научная новизна – исследованы многолетние гидрометеорологические наблюдения, природно-климатические условия, составлена математическая модель тепло- и массообмена залива, методами математической статистики определена корреляционная зависимость, составлено уравнение регрессии для данных климатических условий. Определены и рассчитаны солнечные ресурсные потенциалы аккумулирования тепловой энергии и КПД солнечного излучения, предложена солнечная электростанция и другие энергетические технологии для внедрения в регионе залива Кара-Богаз-Гол.

Исследование основывается на законах физики, теплофизики, термодинамики и методах теплотехнических преобразований. Залив Кара-Богаз-Гол рассмотрен как «солнечный пруд». Предметом исследования является солнечная энергия, а водоем Кара-Богаз-Гол – как тепловой аккумулятор. Методологическую основу составляют полученные ресурсные потенциалы солнечной энергии как аккумулятора теплоты для теплоснабжения потребителей залива Кара-Богаз-Гол.

Гидрометеорологические и химические особенности солевых элементов залива Кара-Богаз-Гол

На юго-востоке Туркменистана на побережье Каспийского моря в соленом заливе Кара-Богаз-Гол солнечное излучение аккумулируется в воде и солевых залежах как тепловой аккумулятор. Площадь залива составляет примерно 18 тыс. км², средняя глубина 4,7 м, местами изменяется от 2,2 до 6,2 м [11, 17, 28, 29].

Концентрация соли в заливе составляет 310 ‰ (в некоторых местах даже доходит до 350 ‰), высока также концентрация глауберовой соли, или мирабилита. Мирабилит представляет собой большой интерес для различных отраслей промышленности. Мирабилит – унаследованный минерал – это прозрачные кристаллы в форме призм, на вкус горький, тает на языке, не имеет запаха, хорошо растворим в воде, не горит. Химическая формула $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, твердость 1,5–2,0 по шкале Мооса; плотность 1,49 г/см³ [20]. При длительном нахождении на воздухе или при нагревании выпаривается (вываривается) и теряет массу. При полном выветривании становится обычным сульфатом натрия – порошком белого цвета. Кроме самой десятиводной глауберовой соли известны ромбические кристаллы семиводного кристаллогидрата $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и одноводная соль $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ [11].

Глауберова соль впервые обнаружена химиком И. Р. Глаубером в составе минеральных вод, а впоследствии синтезирована действием серной кислоты на хлорид натрия, ее применяли в стекольном и содовом производстве и заготавливали растворы для использования в медицине.

Средний температурный режим залива изменяется от 0,9 °C зимой и до 26 °C летом. Максимальная температура летом доходит до 64 °C, средняя минимальная зимой снижается до –3 °C [13, 27, 29]. Температурный режим воды в заливе отличается от Каспийского моря: если средняя температура воды моря составляет 13,5 °C в год, то на заливе она равна 16,9 °C. Количество осадков на территории залива в среднем составляет 104 мм в течение года, в среднем в месяц 8,7 мм, число дней в году без осадков 54, или в месяц 8,6 дня.

Рассчитанные систематизированные ресурсные солнечно-энергетические потенциалы для залива Кара-Богаз-Гол составляют, кВт·ч/(м²·год): валовые – 1685,4; технические, преобразованные в тепловую энергию – 1177,1; в электрическую – 222,1; экономические от преобразования в теп-

ловую энергию – 470,9 и электрическую – 89,1 кг у. т./($\text{м}^2 \cdot \text{год}$). Продолжительность солнечного сияния в год на заливе равна 222,8 ч, или в среднем составляет 7,8 ч в сутки, пасмурные дни наблюдаются примерно 2,65 сут. в год. Ветровой режим меняется по сезонам года – в зимний период повышается и составляет в среднем 6,2 м/с, а летом снижается до 5,7 м/с. Результаты гидрометеорологических наблюдений графически приведены на рис. 1 [11–14, 17, 27, 29].

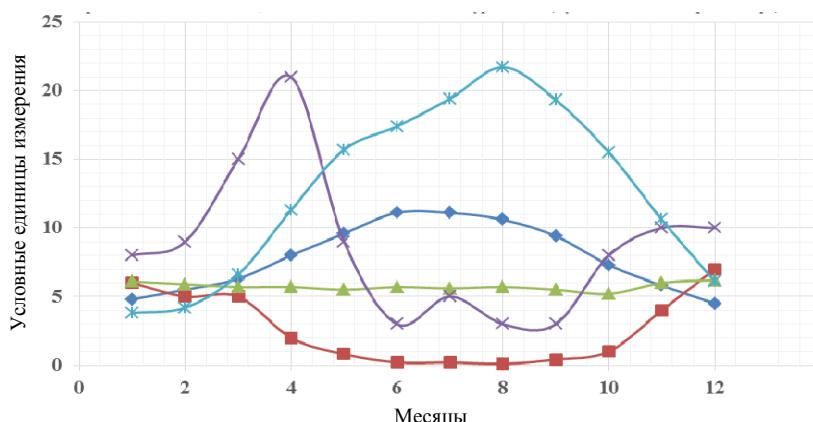


Рис. 1. Метеорологические наблюдения залива Кара-Богаз-Гол по месяцам года:

—◆— продолжительность сияния, ч; —■— количество пасмурных дней, сут.;
—▲— скорость ветра, м/с

Fig. 1. Meteorological observations of the Kara-Bogaz-Gol Bay by months of the year:

—◆— duration of radiance, h; —■— Number of cloudy days, day;
—▲— wind speed, m/s

Солнечно-энергетические особенности залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда»

Энергетические особенности работы «солнечного пруда» заключаются в следующем: солнечное излучение поступает на водную поверхность водоема, часть отражается в окружающую среду, а часть проникает в водоем и попадает в нижний солевой слой, более плотный и концентрированный, который не смешивается с верхним. Это позволяет удерживать тепловую энергию. Иначе говоря, «солнечный пруд» – это накопитель солнечной энергии [25].

Процесс формирования теплоэнергетического режима аккумулирования в соленом водоеме очень сложный. Однако в отдельных частных случаях и при введении ряда упрощающих допущений можно осуществить количественный анализ формирования термических условий в солевых залежах на дне залива.

В водоеме на процесс формирования температурных режимов в соленой воде (на аккумулирование в солевых залежах на дне залива) влияет большое количество факторов: метеорологические факторы – солнечное

излучение, температура воздуха и воды, скорость ветра, облачность и т. д.; термическая характеристика соли и почвы – теплопроводность, теплоемкость, плотность, температуропроводность, альбедо поверхности водоема и солевые залежи; теплотехнические характеристики водоема – кратность объема, плотность, воздухообмен, прозрачность в видимом и инфракрасном частях спектра. Следовательно, определение температур воздуха, воды, соли проводилось с учетом перечисленных факторов.

Методика гидротехнических исследований по динамике теплообмена позволяет сформулировать основные черты упрощенной модели: водоем как система в пространстве, однородно заполненная хорошо перемешанной соленой водой, полуограниченный в водяном массиве; боковые ограждения с нулевой теплоемкостью; солнечное излучение, равномерно распространяющееся по воздушному, водному и солевому пространству залива.

Экспериментальные исследования, как известно, ввиду локального характера полученных данных, а также ввиду различий в методике проведения и обработки данных эксперимента довольно часто не могут быть обобщены и бывают весьма противоречивы. В связи с этим большой интерес вызывают теоретические исследования.

Исходя из этого на основе физического принципа и процесса тепло- и массообмена составлено дифференциальное уравнение теплового энергетического баланса с учетом влияющих факторов: метеорологических (солнечное излучение, температура воздуха, воды, соли, скорость ветра, облачность и др.); термических и теплотехнических характеристик соли, воды (теплопроводность, теплоемкость, плотность, прозрачность, альбедо) для залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда». Тепловое балансовое уравнение за промежуток времени $d\tau$ имеет вид

$$dQ_p^\Sigma - dQ_c - dQ_b - dQ_{th} - dQ_{ab} - dQ_{ac} - dQ_{br} = 0, \quad (1)$$

где dQ_p^Σ – суммарный поток теплоты солнечного излучения, поступающий в солнечный водоем залива, $\text{kVt}\cdot\text{ч}/\text{m}^2$; dQ_{ab} – поток солнечного излучения, аккумулированный в водоеме, $\text{kVt}\cdot\text{ч}/\text{m}^2$; dQ_c – то же, поглощенного солевой поверхностью дна пруда и почвой, $\text{kVt}\cdot\text{ч}/\text{m}^2$; dQ_b – то же, поступающий в водную поверхность водоема, $\text{kVt}\cdot\text{ч}/\text{m}^2$; dQ_{th} – количество теплоты, отдаваемой в атмосферу с поверхности в результате воздухообмена и теплопередачи, $\text{kVt}\cdot\text{ч}/\text{m}^2$; dQ_{br} – то же, отдаваемой в боковые грунтовые поверхности водоема в одномерном пространстве на один квадратный метр (объем не учитываем), $dQ_{br} \approx 0 \text{ кVt}\cdot\text{ч}/\text{m}^2$; dQ_{ac} – поток солнечного излучения, аккумулированный солевым слоем на дне, $\text{kVt}\cdot\text{ч}/\text{m}^2$ [25, 30–34].

Подставляем составляющие в значения к величинам dQ_p^Σ , dQ_b , dQ_c , dQ_{ac} , dQ_{ab} балансового дифференциального уравнения (1) и представим их в виде:

$$dQ_p = (1 - r_b) F q^*(\tau) d\tau; \quad (2)$$

$$dQ_c = c_c \gamma_c \xi_c \rho_c F [T_c(\tau) - T_b(\tau)] d\tau; \quad (3)$$

$$dQ_b = c_b \gamma_b \xi_b \rho_b F [T_b(\tau) - T_h(\tau)] d\tau; \quad (4)$$

$$dQ_{th} = c_b \gamma_b \xi_b \rho_b F [T_b(\tau) - T_h(\tau)] d\tau; \quad (5)$$

$$dQ_{ab} = c_b \gamma_b \rho_b F dT_b(\tau); \quad (6)$$

$$dQ_{ac} = c_c \gamma_c \rho_c F dT_c(\tau), \quad (7)$$

где F – площадь водоема, м^2 ; c_b – объемная теплоемкость соленой воды, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$; γ_b – плотность соленой воды, $\text{кг}/\text{м}^3$; q^* – поток солнечного излучения на горизонтальную поверхность, $\text{kВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$.

Проделав некоторые математические преобразования, находим температурный режим солевого слоя в водоеме T_c , $^\circ\text{C}$, в виде периодического гармоничного ряда

$$T_c = T_{0c} + \sum_{j=1}^n T_{jc} \exp[i(\omega\tau - \phi_j)], \quad (8)$$

где T_{0c} – среднее значение температуры соленой воды водоема, $^\circ\text{C}$; T_{jc} – амплитуда температуры солевого слоя, $^\circ\text{C}$, для j -й гармоники; $i = \sqrt{-1}$ – мнимое число; ω – циклическая частота внешнего теплового воздействия соленой воды на солевой слой, град./ч; τ – время, ч; ϕ_j – угол сдвига фаз, град. Подробное математическое преобразование приведено в работах [3, 30, 32, 33].

Результаты исследования

На основе составленного уравнения теплового балансового (1) рассчитан термический режим залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда» (8). Определены суточные температурные режимы на поверхности солевого слоя и на глубине 0,5 м, с помощью формулы (7) определяем аккумулирование солнечной энергии в летний и зимний периоды года. На рис. 2 приведены результаты расчета суточного аккумулирования солнечного излучения в заливе.

Анализируя графические результаты, делаем выводы, что в течение дня солнечное излучение аккумулируется и составляет:

– на солевой поверхности зимой – 1009,0 $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{сут.})$, или в среднем 77,6 $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{сут.})$; летом – 1574,7 $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{сут.})$, или в среднем 121,1 $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{сут.})$;

– на глубине 0,5 м зимой – 408,0 $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{сут.})$, или в среднем 31,4 $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{сут.})$; летом – 1111,0 $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{сут.})$, или в среднем 85,5 $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{сут.})$.

Температура изменяется:

– на солевой поверхности зимой – от 3,8 до 31,5 $^\circ\text{C}$; летом – от 14,3 до 55,04 $^\circ\text{C}$;

– на глубине 0,5 м зимой – в пределах от 3,8 до 15,76 °C; летом – от 7,16 до 27,52 °C.

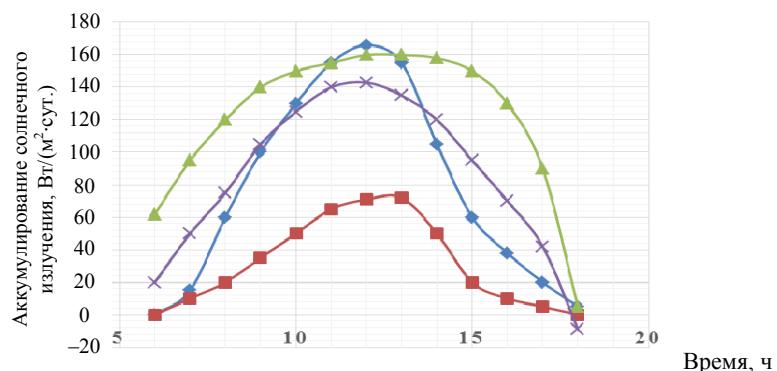


Рис. 2. Суточный ход аккумулирования солнечного излучения в заливе Кара-Богаз-Гол:

— зимой 0 пов. соли; —■— зимой 0,5 м глубине;
—▲— летом 0 пов. соли; —×— летом 0,5 м глубине

Fig. 2. Daily course of solar radiation accumulation in the Karak-Bogaz-Gol Bay:

— blue diamond — 0 table salt in winter; —■— at 0.5 m depth in winter;
— green triangle — 0 table salt in summer; —×— at 0.5 m depth in summer

Процесс аккумулирования солнечной энергии связан с температурой прогрева солевой поверхности слоя, которая меняется по сезонам года. Полученные результаты исследования с использованием составленного дифференциального уравнения теплового баланса для промежутка времени соответствуют законам теплофизики и адекватно воспроизводятся.

Методика статистического анализа. Для разработки, составления проектно-сметной документации и внедрения солнечных энергетических станций возникает необходимость технико-экономического обоснования для прогноза и определения рентабельности энергетических технологий и их энергоэффективности для потребителя.

Используя методы математической статистики, на основании расчетных результатов получены уравнения регрессии и коэффициент корреляции для прогнозирования потенциалов солнечного излучения при преобразовании в тепловую энергию в зависимости от температуры воды и количества аккумулирования солнечной энергии на солевой поверхности и глубине 0,5 м.

Рассмотрим уравнение регрессии $y = a + bx$, где a – начальная ордината, которая дает значение y при $x = 0$; b – коэффициент регрессии, который демонстрирует изменение величины y в среднем при изменении x на единицу [7, 10, 33].

Определим зависимость экономических и технических показателей от гелиоизлучения, взятого в среднем за много лет наблюдений, его трансформацию в энергию, причем показатели были взяты по месяцам года в регионе Кара-Богаз-Гол.

Уравнение регрессии и коэффициент корреляции для аккумулирования солнечной энергии составляют:

– на поверхности соли:

$$\text{зимой} \quad y = -1,1154x + 91; R^2 = 0,0051; \quad (9)$$

$$\text{летом} \quad y = -1,5264x + 139,45; R^2 = 0,0161; \quad (10)$$

– на глубине 0,5 м:

$$\text{зимой} \quad y = -0,5659x + 38,176; R^2 = 0,0066; \quad (11)$$

$$\text{летом} \quad y = -1,533x + 103,86; R^2 = 0,0149. \quad (12)$$

Среднесуточное излучение в январе и июле на солевой поверхности:

$$\text{зимой} \quad y = -4,3956x + 327,75; R^2 = 0,0082; \quad (13)$$

$$\text{летом} \quad y = -1,044x + 599,45; R^2 = 0,0002. \quad (14)$$

Полученные методами математического моделирования процессов тепло- и массообмена уравнения регрессии позволяют рассчитать ТЭО для создания различных солнечно-энергетических станций и в других странах.

Энергетическая станция на прудах. Во многих государствах, таких как Венгрия, Индия, Италия, Израиль, США, Япония, получены значительные успехи в научно-исследовательских работах по повышению энергоэффективности «солнечных прудов». Например, в конце 80-х гг. прошлого столетия на берегу Мертвого моря в Эйн-Бокеке построена солнечная станция на принципе «солнечный пруд» с площадью 7400 м² электрической мощностью 150 кВт, где стоимость 1 кВт·ч электроэнергии равна 10 центам США, т. е. ее себестоимость вполне конкурентоспособна с традиционной [3, 7, 10–15, 28–30].

Рассмотрим возможность строительства энергетической станции на принципе «солнечного пруда» в условиях залива Кара-Богаз-Гол в Каспийском море. Технологическая схема энергетической станции «солнечный пруд» для залива Кара-Богаз-Гол представлена на рис. 3.

Принцип работы электростанции «солнечный пруд» заключается в следующем: из слоя 2 горячая вода поступает в теплообменник 4 (испаритель), где расположен парогенератор, при помощи насоса 8. В парогенераторе низкотемпературный пар поступает в виде низкокипящей жидкости в турбину 5, которая приводит в движение электрогенератор 6. После турбины пар отправляется в конденсатор 7, куда направляется и холодная вода из водоема 3 при помощи насоса 8. Эта схема работает в замкнутом цикле. Энергоэффективность данной системы зависит от перепадов температуры между слоями горячей 2 и холодной 3 воды. Данный принцип не отличается от парогенераторных электростанций [3, 7–15, 20, 23, 25, 30].

Средняя температура в летний период на солевой поверхности дна поднимается от 55,04 до 79,8 °C, зимой опускается до 20 °C. Температура поверхности водоема зимой не выше средней температуры наружного воздуха и в январе равна 3,8 °C, а на поверхности водоема 3,4 °C, летом соответственно 21,7 и 30,5 °C.

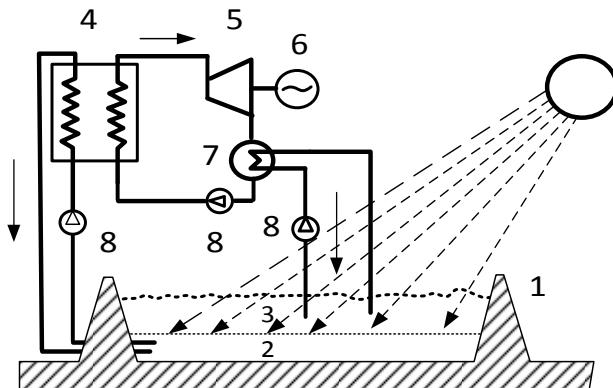


Рис. 3. Солнечная электростанция на заливе Кара-Богаз-Гол как «солнечном пруде»:
1 – дамба; 2 – горячая вода с высокой концентрацией соли; 3 – охлажденная вода;
4 – теплообменник; 5 – турбина; 6 – электрогенератор; 7 – конденсатор; 8 – насосы

Fig. 3. Solar power plant on the Kara-Bogaz-Gol Bay as a “solar pond”:
1 – dam; 2 – hot water with a high concentration of salt; 3 – chilled water;
4 – heat exchanger; 5 – turbine; 6 – electric generator; 7 – capacitor; 8 – pumps

По предварительным расчетам, летом на 1 км² залива можно получить 60 м³ воды со средней температурой 75,0 °С, а зимой – 25,0 °С. На сегодняшний день в мировой практике используются ряд соленых озер и морей с искусственными «солеными прудами» для производства теплоты, этот процесс относится к классу активных солнечных систем.

Из мирового опыта известно, что возникают проблемы при создании турбин, работающих при низких давлениях и температурах, усилении вращения электрогенератора с увеличением размера, при поступлении в газогенератор воды с высокой концентрацией соли (вызывает серьезные проблемы с коррозионной стойкостью данных устройств) [7, 10–16, 19–22].

Предварительные технико-экономические расчеты. Использование естественного соленого водоема Кара-Богаз-Гол позволяет сократить затраты на различные механизированные мероприятия при строительстве гидроузла, искусственной теплоизоляции дна водоема, так как это существенно повышает себестоимость преобразования теплоты. Возможность получения повышенной температуры рассола, пригодного для обеспечения прямого теплоснабжения, для потребителя приведена в расчетах на рис. 1, 2. Результаты показывают, что аккумулирование солнечной энергии зимой в сутки на глубине 0,5 м в среднем составляет 31,4 Вт/(м²·сут.), летом – 85,5 Вт/(м²·сут.), на солевую поверхность в среднем поступает летом 586,9 Вт/(м²·сут.) солнечной энергии, зимой – 275,0 Вт/(м²·сут.). Полученные результаты расчетов также могут быть использованы на меньшей глубине при комбинации с тепловыми насосами.

Например, при тепловой нагрузке 60 Вт/м² возможно обеспечивать потребителей горячей водой в течение всего года. Такой вариант строительства «солнечных прудов» в заливе Кара-Богаз-Гол в сравнении с традиционным имеет многие преимущества, так как не требуются:

- расходы на рытье котлована, поскольку глубина залива в среднем составляет 4,7 м, в данном случае 1 м;

- затраты на соль, создание большого градиента концентрации рассола;
- процедура контроля поддержания заливом солесодержания при сниженных градиентах температуры.

Все перечисленное выше существенно снижает эксплуатационные расходы.

ВЫВОДЫ

1. Оценены ресурсные потенциалы солнечного излучения залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда» для использования и внедрения различных солнечных энергетических технологий для энергосбережения в Каспийском регионе.

2. Полученные научные результаты обоснованы на базе физических законов, процессов тепло- и массообмена, математического анализа залива как «солнечного пруда», что адекватно воспроизводят результаты математической модели.

3. Оценены тепловые энергетические характеристики для внедрения различных солнечных энергетических аккумулирующих технологий. Предварительно КПД зимой составит 1,14 %, летом – 1,46 %. Мощность аккумулирования солнечной энергии в среднем составляет: на солевой поверхности 1 м² летом – 586,9 Вт/(м²·сут.), зимой – 275,0 Вт/(м²·сут.); на глубине солевой залежи 0,5 м зимой – 31,4 Вт/(м²·сут.), летом – 85,5 Вт/(м²·сут.).

4. Мощность системы заряда и разряда солнечной батареи на солевой поверхности меняется по сезонам года: заряжается летом (август) до 70 %, разряжается зимой (январь) до 40 %. Средняя температура солевой поверхности дна в летний период поднимается от 55,04 °С (май) до 79,8 °С (в сентябре) и снижается зимой до 20,0 °С (в январе) и начинает подниматься в марте до 25,6 °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бердымухамедов, Г. М. Туркменистан на пути достижения целей устойчивого развития / Г. М. Бердымухамедов. Ашхабад: Туркменская государственная изд. служба, 2018. 468 с.
2. Бердымухамедов, Г. М. Электроэнергетическая мощь Туркменистана / Г. М. Бердымухамедов. Ашхабад: Туркменская государственная изд. служба, 2022. 130 с.
3. Пенджкиев, А. М. Экоэнергетические ресурсы возобновляемых источников энергии / А. М. Пенджкиев. М.: Руслайнс, 2023. 400 с.
4. 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>.
5. Прогнозирование часов пик энергопотребления региональных энергосистем / С. Р. Саитов [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 1. С. 78–91. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-78-91>.
6. Письменная, У. Е. Устойчивые энергетические трансформации: нивелирование негативных экстерналий / У. Е. Письменная, Г. С. Трипольская // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 4. С. 312–327. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-312-327>.
7. Солнечная энергетика: учеб. пособие для вузов / В. И. Виссарионов, Г. В. Дерюгина, В. А. Кузнецова, Н. К. Малинин; под общ. ред. В. И. Виссарионова. М.: Изд. дом МЭИ, 2008. 276 с.
8. Даффи, Д. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Д. А. Даффи, У. А. Бекман. М.: Мир, 1977. 429 с.

9. Дубковский, В. Использование солнечных прудов в комбинированных энергоустановках / В. Дубковский, А. Денисова // Экотехнологии и ресурсосбережение. 2000. № 2. С. 11–13.
10. Стребков, Д. С. Основы солнечной энергетики / Д. С. Стребков; под ред. П. П. Безруких. М.: САМ Полиграфист, 2019. 326 с.
11. Кара-Богаз-Гол: как все были уверены, что именно это озеро убивает Каспийское море // Энциклопедия географа. URL: <https://enciclopediya-geografa.ru/puteshestviya/6016-kara-bogaz-gol-kak-vse-byli-uvereny-chto-imenno-eto-ozero-ubivaet-kaspiyskoe-more.html>
12. Некоторые результаты теоретического и экспериментального исследования теплового режима соляного солнечного бассейна / Ю. У. Умаров, Л. Н. Тесленко, В. Н. Елисеев, Г. Я. Умаров // Гелиотехника. 1973. № 2. С. 37–42.
13. Анализ тепловых характеристик и конвективной устойчивости солнечного пруда / О. С. Попель, С. Е. Фрид, Е. М. Шелков [и др.] // Тр. Европейского симпозиума по солнечной энергии. Варна, НРБ. 13–17 сентября 1983. С. 27.
14. Попель, О. С. Исследование систем теплоснабжения на основе солнечных прудов: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.08 / О. С. Попель; АН СССР. Ин-т высоких температур. М.: ИВТАН, 1988.
15. Перспективы строительства опытно-промышленного солнечного пруда в Крыму / О. С. Попель, Н. М. Сонина, Л. А. Яскин, И. А. Зенкова // Энергетическое строительство. 1992. № 2. С. 9–14.
16. Kosarev A.N. Kara-Bogaz-Gol Bay: Physical and Chemical Evolution / A. N. Kosarev, A. G. Kostianoy, I. S. Zonn // Aquatic Geochemistry. 2009. Vol. 15. P. 223–236. <https://doi.org/10.1007/s10498-008-9054-z>.
17. Dickinson, W. C. Shallow Solar Ponds for Industrial Process Heat: the ERDA–SOHIO project (No. UCRL-78288; CONF-760821-4) / W.C. Dickinson, A. F. Clark, A. Iantuono. California Univ., Livermore (USA). Lawrence Livermore Lab., 1976.
18. Kudish, A. I. Compact Shallow Solar Pond Hot Water Heater / A. I. Kudish, D. Wolf // Solar Energy. 1978. Vol. 21, № 4. P. 317–322. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(78\)90008-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(78)90008-7).
19. Sodha, M. S. Physics of Shallow Solar Pond Water Heater / M. S. Sodha, J. K. Navak, S. C. Kaushik // International Journal of Energy Research. 1980. Vol. 4, No 4. P. 323–337. <https://doi.org/10.1002/er.4440040404>.
20. Sodha, M. S. Shallow Solar Pond Water Heater: an Analytical Study / M. S. Sodha, G. N. Tiwari, J. K. Nayak // Energy Conversion and Management. 1981. Vol. 21, No 2. P. 137–139. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(81\)90035-2](https://doi.org/10.1016/0196-8904(81)90035-2).
21. Merriam, M. F. Electricity Generation from Non-Convective Solar Ponds in California: Report of University Wide energy Research Group (UER 109) / M. F. Merriam. University of California, Universitywide Energy Research Group, 1983.
22. Abou-Chakra, F. N. Analyses of the Sources, Factors and Treatment Methods Affecting Turbidity at the El Paso Solar Pond: Theses Masters Science / F. N. Abou-Chakra. The University of Texas at El Paso, 1992.
23. Popel, O. S. A Generalized Stationary Model for Solar Pond / O. S. Popel // Proc. of ISES Solar World Congress. Hamburg: ERG, 1987. P. 243–247.
24. Popel, O. S. Solar Ponds: the State of the Art of R&D Efforts / O. S. Popel // Development and Use of Effective Solar Systems: H-1SES Workshop. Budapest, Hungary, 2–3 June 1988.
25. Popel, O. S. The Models of Processes for Converting the Solar Energy in Solar Ponds and Their Practical Utilization / O. S. Popel, E. E. Shpilrain, S. E. Frid // North Sun'88. Solar Energy at High Latitudes: Proc. of the Int. Conf. Borlange, Sweden, 29–31 August, 1988.
26. Использование солнечной энергии / под общ. ред. Л. Е. Рыбаковой. Ашхабад: Ылым, 1985. 280 с.
27. Стребков, Д. С. Развитие солнечной энергетики в Туркменистане / Д. С. Стребков, А. М. Пенджиев, Б. Д. Мамедсахатов. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2012. 498 с.
28. Penjiyev, A. M. Solar Energy Resource Potential of the Garabogazköl Gulf in the Caspian Sea / A. M. Penjiyev, P. O. Orazov // Geography and Natural Resources. 2025. Vol. 46, No 2. P. 212–219. <https://doi.org/10.1134/s1875372825700234>.
29. Penjiyev, A. M. Wave Energy Resources of the Caspian Sea on the Coast of Turkmenistan / A. M. Penjiyev // Applied Solar Energy. 2022. Vol. 58, No 2. P. 306–310. <https://doi.org/10.3103/s0003701x22020141>.

30. Байрамов, Р. Б. Математическая модель для описания теплового режима гелиотеплицы траншейного типа / Р. Б. Байрамов, Л. Е. Рыбакова, А. М. Пенджиев // Гелиотехника. 1985. № 4. С. 41–44.
31. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3: Многолетние данные. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. Вып. 30: Туркменская ССР / Туркменское респ. упр. по гидрометеорологии. 500 с.
32. Пенджиев, А. М. Агротехника выращивания дынного дерева (*Carica papaya L.*) в условиях защищенного грунта в Туркменистане: автореф. дис. ... докт. сельхоз. наук: 06.03.01 / А. М. Пенджиев; Московский государственный ун-т леса. М., 2000. 54 с.
33. Пенджиев, А. М. Математическое моделирование микроклимата в солнечной теплице траншейного типа / А. М. Пенджиев // Альтернативная энергетика и экология. 2010. № 7. С. 88–96.
34. Пенджиев, А. М. Научное обоснование использования энергетических технологий на основе возобновляемых источников энергии в Туркменистане: автореф. дис. ... докт. тех. наук: 05.14.08 / А. М. Пенджиев; Федеральный научный агринженерный центр ВИМ. Ашхабад, 2022. 42 с.

Received: 23 July 2025 Accepted: 25 September 2025 Published online: 28 November 2025

REFERENCES

1. Berdimuhamedov G. M. (2018) *Turkmenistan on the Way to Achieving Sustainable Development Goals*. Ashgabat, Turkmen State Publishing Service. 468 (in Russian).
2. Berdimuhamedov G. M. (2022) *Electric Power Capacity of Turkmenistan*. Ashgabat, Turkmen State Publishing Service. 130 (in Russian).
3. Penjiyev A. M. (2023) *Eco-Energy Resources of Renewable Energy Sources*. Moscow, Russains Publ. 400 (in Russian).
4. 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).
5. Saitov S. R., Chichirova N. D., Filimonova A. A., Karnitsky N. B. (2024) Forecasting Peak Hours for Energy Consumption in Regional Power Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (1), 78–91. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-78-91> (in Russian).
6. Pysmenna U. Ye., Trypolska G. S. (2020) Sustainable Energy Transitions: Overcoming Negative Externalities. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (4), 312–327. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-312-327>.
7. Vissarionov V. I., Deryugina G. V., Kuznetsova V. A., Malinin N. K. (2008) *Solar Energy*. Moscow, Publishing House of Moscow Power Engineering Institute. 276 (in Russian).
8. Duffie J. A., Beckman W. A. (1974) *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, Inc. Published. 429.
9. Dubkovsky V., Denisova A. (2000) Use of Solar Ponds in Combined Power Plants. *Ekotekhnologii i Resursosberezhenie = Ecotechnologies and Resource Saving*, (2), 11–13.
10. Strebkov D. S. (2019) *Fundamentals of Solar Energy*. Moscow, Publishing House SAM Poligraphist Publ. 326 (in Russian).
11. Kara-Bogaz-Gol: How Everyone Was Sure That This Lake Was Killing the Caspian Sea // Entsiklopediya Geografa [Encyclopedia of the Geographer]. URL: <https://enciclopediya-geografa.ru/puteshestviya/6016-kara-bogaz-gol-kak-vse-byli-uvereny-chto-imenno-eto-ozero-ubivaet-kaspiyskoe-more.html> (in Russian).
12. Umarov Yu. U., Teslenko L. N., Eliseev V. N., Umarov G. Ya. (1973) Some Results of Theoretical and Experimental Study of the Thermal Regime of a Salt Solar Pool. *Geliotekhnika = Applied Solar Energy*, (2), 37–42 (in Russian).

13. Popel O. S., Fried S. E., Shelkov E. M. [et al.] (1983) Analysis of Thermal Characteristics and Convective Stability of a Solar Pond. *Proceedings of the European Symposium on Solar Energy*. Varna, NRB, September 13–17, 27 (in Russian).
14. Popel O. S. (1988) *Study of Heat Supply Systems Based on Solar Ponds* [Dissertation]. Moscow, Institute for High Temperatures of Academy of Sciences (in Russian).
15. Popel O. S., Sonina N. M., Yaskin L. A., Zenkova I. A. (1992) Prospects for the Construction of a Pilot Solar Pond in Crimea. *Energeticheskoe Stroitelstvo* [Energy Construction], (2), 9–14 (in Russian).
16. Kosarev A. N., Kostianoy A. G., Zonn I. S. (2008) Kara-Bogaz-Gol Bay: Physical and Chemical Evolution. *Aquatic Geochemistry*, 15(1–2), 223–236. <https://doi.org/10.1007/s10498-008-9054-z>.
17. Dickinson W. C., Clark A. F., Iantuono A. (1976) *Shallow Solar Ponds for Industrial Process Heat: the ERDA-SOHIO project (No. UCRL-78288; CONF-760821-4)*. California Univ., Livermore (USA). Lawrence Livermore Lab.
18. Kudish A. I., Wolf D. (1978) A compact shallow solar pond hot water heater. *Solar Energy*, 21 (4), 317–322. [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(78\)90008-7](https://doi.org/10.1016/0038-092x(78)90008-7).
19. Sodha M. S., Nayak J. K., Kaushik S. C. (1980) Physics of shallow solar pond water heater. *International Journal of Energy Research*, 4 (4), 323–337. <https://doi.org/10.1002/er.4440040404>.
20. Sodha M. S., Tiwari G. N., Nayak J. K. (1981) Shallow solar pond water heater: An analytical study. *Energy Conversion and Management*, 21 (2), 137–139. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(81\)90035-2](https://doi.org/10.1016/0196-8904(81)90035-2).
21. Merriam M. F. (1983) *Electricity Generation from Non-Convective Solar Ponds in California: Report of University Wide energy Research Group (UER 109)*. University of California, Universitywide Energy Research Group (in Russian).
22. Abou-Chakra F. N. (1992) *Analyses of the Sources, Factors and Treatment Methods Affecting Turbidity at the El Paso Solar Pond*: Theses Masters Science. The University of Texas at El Paso.
23. Popel O. S. (1987) A Generalized Stationary Model for Solar Pond. *Proc. of ISES Solar World Congress*. Humburg, ERG, 243–247.
24. Popel O. S. (1988) Solar Ponds: the State of the Art of R&D Efforts. *Development and Use of Effective Solar Systems: H-ISES Workshop*. Budapest, Hungary, 2–3 June 1988.
25. Popel O. S., Shpilrain E. E., Frid S. E. The Models of Processes for Converting the Solar Energy in Solar Ponds and Their Practical Utilization. *North Sun'88. Solar Energy at High Latitudes: Proc. of the Int. Conf. Borlange*, Sweden, 29–31 August, 1988.
26. Rybakova L. E. (ed.) (1985) *Use of Solar Energy*. Ashgabat, Ylym Publ. 280 (in Russian).
27. Strebkov D. S., Penjiyev A. M., Mamedsakhatov B. D. (2012) Development of solar energy in Turkmenistan. Moscow, State Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Electrification of Agriculture”. 498 (in Russian).
28. Penjiyev A. M., Orazov P. O. (2025) Solar Energy Resource Potential of the Garabogazköl Gulf in the Caspian Sea. *Geography and Natural Resources*, 46 (2), 212–219. <https://doi.org/10.1134/s1875372825700234>.
29. Penjiyev A. M. (2022) Wave Energy Resources of the Caspian Sea on the Coast of Turkmenistan. *Applied Solar Energy*, 58 (2), 306–310. <https://doi.org/10.3103/s0003701x22020141>.
30. Bayramov R. B., Rybakova L. E., Penjiyev A. M. (1985) Mathematical Model for Describing the Thermal Regime of a Trench-Type Solar Greenhouse. *Geliotekhnika = Applied Solar Energy*, (4), 41–44 (in Russian).
31. Turkmen Republican Department of Hydrometeorology (1989) *Scientific and Applied Reference Book on the Climate of the USSR. Series 3. Long-term data. Issue 30: Turkmen SSR*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. 502 (in Russian).
32. Penjiyev A. M. (2000) Agricultural Technology for Growing Melon Trees (*Carica Papaya L.*) in Protected Soil Conditions in Turkmenistan [Dissertation]. Moscow. 54 (in Russian).
33. Penjiyev A. M. (2010) Mathematical Modeling of Microclimate in a Solar Trench-Type Greenhouse. *Alternativnaya Energetika i Ekologiya = Alternative Energy and Ecology*, (7), 88–96 (in Russian).
34. Penjiyev A. M. (2022) Scientific Substantiation of the Use of Energy Technologies Based on Renewable Energy Sources in Turkmenistan [Dissertation]. Ashgabat. 42 (in Russian).

**ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ,
ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ «ЭНЕРГЕТИКА»
в 2025 г.**

I. ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

105 лет лидеру технического образования в Беларуси	6
--	---

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Вельченко А. А., Павлюковец С. А., Радкевич А. А., Ибрагим А. К. Энергоэффективное нейросетевое управление бесколлекторным двигателем постоянного тока	1
Высоцкий М. Э. Выбор схемы заземления экранов силовых кабельных линий	5
Высоцкий М. Э. Определение оптимальных параметров грунтовой засыпки при прокладке силовых кабельных линий	2
Gade S., Sangole M., Agrawal R., Patil D., Jha R., Risodkar Y., Kumar A. Distributed Generation Planning Using the R Method (Гадэ С., Санголе М., Аgravал Р., Патиль Д., Джха Р., Рисодкар Й., Кумар А. Планирование распределенной генерации с использованием метода R)	6
Гречихин Л. И. Вольт-амперные характеристики выпрямительных диодов металл – полупроводник. Ч. 1: Формирование токов проводимости и токов смещения на $p-n$ переходе	3
Гречихин Л. И. Вольт-амперные характеристики выпрямительных диодов металл – полупроводник. Ч. 2: Вольт-амперные характеристики диодов металл – полупроводник	4
Гречихин Л. И. Теория биполярного транзистора с учетом строения твердого тела и наличия отрицательных ионов. Ч. 1: Строение полупроводникового твердого тела, легированного мышьяком и индием	6
Esman A. K., Zykov G. L., Kuleshov V. K. Simulation of Electromagnetic Characteristics of a Terahertz Receiver (Есман А. К., Зыков Г. Л., Кулешов В. К. Моделирование электромагнитных характеристик приемника терагерцевого излучения)	6
Зализный Д. И., Селиверстов Г. И., Кроль Д. Г. Расчет температур в проводах низковольтных воздушных линий электропередачи	4
Косенко А. Д., Величко В. А., Косенко А. А. Система автоматизированной обработки результатов тепловизионной диагностики электрооборудования	4
Мурадалиев А. З., Исмаилова С. М. Повышение эффективности диагностики состояния силовых трансформаторов	5
Новиков Н. Л., Нечитаев Р. А., Кашин М. А. Потери энергии в конструктивных элементах электрооборудования при нарушении симметрии параметров режима электропередачи	2
Олейников А. М., Канов Л. Н. Определение мест повреждения изоляции неоднородной линии электроснабжения	1
Романюк Ф. А., Румянцев Ю. В., Румянцев В. Ю. Коррекция амплитудной и фазовой погрешностей сигнала в микропроцессорных системах автоматизации и релейной защиты при изменении частоты	1
Романюк Ф. А., Румянцев Ю. В., Румянцев В. Ю., Дерюгина Е. А. Влияние переходной характеристики цифрового фильтра на поведение микропроцессорной токовой защиты	2
Румянцев В. Ю., Румянцев Ю. В., Романюк Ф. А., Дерюгина Е. А. Повышение быстродействия цифрового фильтра Фурье в измерительных органах микропроцессорных защит	3
Секретарев Ю. А., Горшунов А. А. Модели текущего технического состояния электрооборудования для расчета надежности систем электроснабжения mono-потребителей в рамках риск-ориентированного подхода	1
Серенков П. С., Романчак В. М., Богуславский С. И., Селятицкий А. А., Климкович П. И., Карташев А. В., Старовойтов И. В. Комплекс методов прогнозирования метрологической исправности приборов учета электрической энергии	5

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Гориченко С. Ф. Развитие методологии технического диагностирования трубопроводов газораспределительной системы и анализ эффективности способов восстановления их работоспособности	2
Зеленухо Е. В., Цыганова А. А., Бельская Г. В. Биогаз и свалочный газ как источники возобновляемой энергии в Республике Беларусь	5
Игнатович Р. С. Принципы организации и функционирования мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях водородной энергетики	1
Корсак Е. П., Романко В. А. Имитационное моделирование и вероятностный анализ безопасности в управлении рисками АЭС	5
Ольшанский А. И., Голубев А. Н. Исследования конвективной сушки тонких и толстых влажных материалов	5
Ольшанский А. И., Жерносек С. В. Температура в периоде падающей скорости сушки тонких плоских капиллярно-пористых влажных материалов	3
Пенджиев А. М., Мамедов Б. М. Залив Кара-Богаз-Гол как «солнечный пруд» и его энергетические характеристики	6
Пехота Е. А., Романик В. Н. Анализ экспериментальных данных применения дегазационно-вентиляционного устройства при дегазации газгольдеров, содержащих низконапорный газ пропан	6
Романик В. Н., Нияковский А. М., Струцкий Н. В., Свищун А. Л. Почвенно-грунтовые факторы, влияющие на процесс коррозии стальных подземных трубопроводов, и их компьютерное моделирование	3
Рыжова Т. В., Тумаркина Д. Д., Бухаров Д. Н., Самышкин В. Д., Лелекова А. Ф., Аракелян М. М., Кучерик А. О., Аракелян С. М. Технологии улучшения эксплуатационных характеристик динамических газожидкостных теплоЭнергетических установок при управляемом лазерном индуцировании регулируемых локальных конфигураций топологических микро- иnanoструктур на внутренней металлической поверхности рабочих камер	6
Сафаров Ж. Э., Султанова Ш. А., Гунеш Г., Понасенко А. С., Самандиров Д. И., Пуллатов М. М., Миркомилов А. М., Насирова М. А. Исследование эффективного коэффициента диффузии и энергии активации с целью энергосбережения при конвекционной сушке	1
Седнин В. А., Храмцов П. П., Седнин Н. А. Аналитическое решение математической модели анаэробного брожения в проточном биореакторе при производстве биогаза	3
Сухоцкий А. Б., Кунтыш В. Б. Влияние технологических факторов процесса изготовления биметаллической ребристой трубы на интенсивность теплопередачи аппаратов воздушного охлаждения	2
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	4
Filimonova A. A., Vlasova A. Yu., Chichirova N. D., Kamalieva 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)	4
Янчук В. В., Романик В. Н. Использование дымовых газов котла для абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов системы регенеративного подогрева подпиточной воды	4

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

Бирюлин М. А., Волков А. В., Дружинин А. А., Шарий В. Н., Качанов И. В., Бровка Г. М. Оценка влияния изменения давления в проточной части на биологическую безопасность осевой гидротурбины при увеличении толщины лопасти рабочего колеса	2
---	---

ЭКОНОМИКА ЭНЕРГЕТИКА

Зорина Т. Г., Александрович С. А., Кондрусев В. Ю., Старostenко К. В. Методический подход к оценке затрат на увеличение электропотребления в Республике Беларусь в условиях развития атомной энергетики	3
--	---

II. ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Агравал Р., 6
 Александрович С. А., 3
 Аракелян М. М., 6
 Аракелян С. М., 6

Б

Бельская Г. В., 5
 Бирюлин М. А., 2
 Богуславский С. И., 5
 Бровка Г. М., 2
 Бухаров Д. Н., 6

В

Величко В. А., 4
 Вельченко А. А., 1
 Власова А. Ю., 4
 Волков А. В., 2
 Высоцкий М. Э., 2, 5

Г

Гадэ С., 6
 Голубев А. Н., 5
 Гориченко С. Ф., 2
 Горшунов А. А., 1
 Гречихин Л. И., 3, 4, 6
 Гунеш Г., 1

Д

Дерюгина Е. А., 2, 3
 Джха Р., 6
 Дружинин А. А., 2

Е

Есман А. К., 6

Ж

Жерносенк С. В., 3

З

Зализный Д. И., 4
 Зеленухо Е. В., 5

Зорина Т. Г., 3
 Зыков Г. Л., 6

И

Ибрагим А. К., 1
 Игнатович Р. С., 1
 Исмаилова С. М., 5

К

Камалиева, Р. Ф., 4
 Канов Л. Н., 1
 Карницкий Н. Б., 4
 Картавцев А. В., 5
 Качанов И. В., 2
 Кашин М. А., 2
 Климкович П. И., 5
 Кондрусев В. Ю., 3
 Корсак Е. П., 5
 Косенко А. А., 4
 Косенко А. Д., 4
 Кроль Д. Г., 4
 Кулешов В. К., 6
 Кумар А., 6
 Кунтыш В. Б., 2
 Кучерик А. О., 6

Л

Лелекова А. Ф., 6

М

Мамедов Р. А., 4
 Мамедов Б. М., 6
 Миркомилов А. М., 1
 Мурадалиев А. З., 5

Н

Насирова М. А., 1
 Нечитаев Р. А., 2
 Нияковский А. М., 3
 Новиков Н. Л., 2

О

Олейников А. М., 1
 Ольшанский А. И., 3, 5

П

Павлюковец С. А., 1
 Патиль Д., 6
 Пенджиев А. М., 6
 Пехота Е. А., 6
 Понасенко А. С., 1
 Пулатов М. М., 1

Р

Радкевич А. А., 1
 Рахматов О. И., 4
 Рисодкар Й., 6
 Романко В. А., 5
 Романчак В. М., 5
 Романик В. Н., 3, 4, 6
 Романик Ф. А., 1, 2, 3
 Румянцев В. Ю., 1, 2, 3
 Румянцев Ю. В., 1, 2, 3
 Рыжова Т. В., 6

С

Самандаров Д. И., 1
 Самышкин В. Д., 6
 Санголе М., 6
 Сафаров А. Б., 4
 Сафаров Ж. Э., 1
 Свистун А. Л., 3
 Седнин В. А., 3, 4
 Седнин Н. А., 3
 Секретарев Ю. А., 1
 Селиверстов Г. И., 4
 Селятыцкий А. А., 5
 Серенков П. С., 5

Старовойтов И. В., 5
 Старostenko К. В., 3
 Струцкий Н. В., 3
 Султанова Ш. А., 1
 Сухоцкий А. Б., 2

Т

Тумаркина Д. Д., 6

У

Узаков Г. Н., 4

Ф

Филимонова А. А., 4

Ч

Храмцов П. П., 3

Ц

Цыганова А. А., 5

Ч

Чичирова Н. Д., 4

Ш

Шарий В. Н., 2

Я

Янчук В. В., 4