

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

ВЕСЦІ

НАЦЫЯНАЛЬнай АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. 2022. Т. 67, №3

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. 2022. Т. 67, №3

Журнал основан в 1956 г. как «Весці Акадэміі навук БССР. Серыя фізіка-тэхнічных навук», с 1992 г. – «Весці Акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук», с 1998 г. – современное название

Выходит четыре раза в год

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь, свидетельство о регистрации № 391 от 18 мая 2009 г.

Входит в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований, включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Г л а в н ы й р е д а к т о р

Сергей Антонович Чижик –

Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Р е д а к ц и о н н а я к о л л е г и я

А. П. Ласковнѳ – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь (*заместитель главного редактора*)

И. А. Старостина (*ведущий редактор журнала*)

П. А. Витязь – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Ю. Гавлик – Институт технологии машиностроения и автоматизации производства Краковской политехники имени Тадеуша Костюшко, Краков, Республика Польша

Г. Жинтялис – Литовская академия наук, Вильнюс, Литовская Республика

В. Г. Залесский – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

- А. Ф. Ильющенко** – Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии – Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, Минск, Республика Беларусь
- Б. Каталинич** – Центрально-Европейское отделение Международной инженерной академии, Вена, Австрийская Республика
- С. М. Костромицкий** – Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- А. Г. Кравцов** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- Л. Г. Красневский** – Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- А. М. Маляревич** – Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь
- В. П. Маркевич** – Институт фотоники Университета г. Манчестер, Манчестер, Великобритания
- Н. К. Мышкин** – Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь
- А. Г. Наумовец** – Национальная академия наук Украины, Киев, Украина
- О. Г. Пенязков** – Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- К. А. Солнцев** – Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация
- Л. Танович** – Белградский университет, Белград, Республика Сербия
- В. М. Федосюк** – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, Минск, Республика Беларусь
- М. Л. Хейфец** – Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

*Адрес редакции:
ул. Академическая, 1, к. 118, 220072, г. Минск, Республика Беларусь.
Тел.: + 375 17 374-02-45; e-mail: ftvesti@mail.ru
vestift.belnauka.by*

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ.

Серия физико-технических наук. 2022. Т. 67, № 3

Выходит на русском, белорусском и английском языках

Редактор *И. А. Старостина*
Компьютерная верстка *А. В. Новик*

Подписано в печать 22.09.2022. Выход в свет 29.09.2022. Формат 60 × 84 ¹/₈. Бумага офсетная.

Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 66 экз. Заказ 180.

Цена номера: индивидуальная подписка – 12,66 руб., ведомственная подписка – 29,74 руб.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/18 от 02.08.2013. ЛП № 02330/455 от 30.12.2013. Ул. Ф. Скорины, 40, 220084, г. Минск, Республика Беларусь

© РУП «Издательский дом «Беларуская навука»,
Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук, 2022

PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

PHYSICAL-TECHNICAL SERIES, 2022, vol. 67, no. 3

The Journal was founded in 1956 under the titles
“Proceedings of the Academy of Sciences of BSSR. Physical-technical series”,
since 1992 – “Proceedings of the Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series”,
since 1998 – it comes under its actual title

Issued four times a year

Founder is the National Academy of Sciences of Belarus

The Journal was registered on May 18, 2009 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus
in the State Registry of Mass Media, reg. no. 391

*The Journal is included in The List of Journals for Publication of the Results
of Dissertation Research in the Republic of Belarus and in the database
of Russian Science Citation Index (RSCI)*

E d i t o r - i n - C h i e f

Sergei A. Chizhik – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

E d i t o r i a l B o a r d

Alexander P. Laskovnev – Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,
Republic of Belarus (*Associate Editor-in-Chief*)

Irina A. Starostsina (*lead editor*)

Pyotr A. Vityaz – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Józef Gawlik – Institute for Manufacturing Engineering and Automation of Cracow University
of Technology, Cracow, Republic of Poland

Gintautas Žintelis – Lithuanian Academy of Sciences, Vilnius, Republic of Lithuania

Vitali G. Zalesski – Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,
Republic of Belarus

Aliaksandr Ph. Ilyshchanka – State Scientific and Production Association of Powder Metallurgy – Academician
O. V. Roman Institute of Powder Metallurgy, Minsk, Republic of Belarus

Branko Katalinic – Central-European Branch of the International Engineering Academy, Vienna, Republic
of Austria

Sergei M. Kostromitsky – Radio Engineering Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,
Republic of Belarus

Leonid G. Krasnevski – Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences
of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Alexander G. Kravtsov – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic
of Belarus

Alexander M. Malyarevich – Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Vladimir P. Markevich – Photon Science Institute and School of Electrical and Electronic Engineering,
University of Manchester, Manchester, United Kingdom
Nikolai K. Myshkin – V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences
of Belarus, Gomel, Republic of Belarus
Anton G. Naumovets – National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine
Oleg G. Penyazkov – A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences
of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Konstantsin A. Solntsev – A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science of the Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russian Federation
Lyubodrag Tanovich – University of Belgrade, Belgrade, Republic of Serbia
Valeri M. Fedosyuk – Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences
of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Mikhail L. Kheifetz – Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,
Republic of Belarus

*Address of the Editorial Office:
1, Akademicheskaya Str., room 118, 220072, Minsk, Republic of Belarus.
Tel.: +375 17 374-02-45; e-mail: ftvesti@mail.ru
vestift.belnauka.by*

PROCEEDING OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS.

Physical-technical series, 2022, vol. 67, no. 3

Printed in Russian, Belarusian and English languages

Editor *I. A. Starostina*
Computer imposition *A. V. Novik*

It is sent of the press 22.09.2022. Appearance 29.09.2022. Format 60×84 1/8. Offset paper. The press digital.

Printed pages 10,23. Publisher's signatures 11,3. Circulation 66 copies. Order 180.

Number price: individual subscription – 12,66 byn., departmental subscription – 29,74 byn.

Publisher and printing execution:

Republican unitary enterprise "Publishing House "Belaruskaya Navuka"

Certificate on the state registration of the publisher, manufacturer, distributor of printing editions No. 1/18 dated August 2,
2013. License for the press No. 02330/455 dated December 30, 2013. Address: 40, F. Scorina Str., Minsk, 220084,
Republic of Belarus.

© RUE "Publishing House "Belaruskaya Navuka",
Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series, 2022

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Перещук С. В., Волчек О. М., Прушак В. Я. Влияние температуры прессования галургического хлористого калия на параметры работы грануляционных установок *(на английском языке)* 263

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

Волчок А. Т., Янкевич С. Н., Хроль И. Н., Подорожня И. В., Калиновский Н. А. Применение вибродиагностики при создании элементов персонального электротранспорта 269

Руденко С. П., Сандомирский С. Г. Расчетная модель напряженного состояния зоны контакта зубьев поверхности упрочненных зубчатых колес 277

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

Волчэк В. С., Баранова М. С., Стемпицкий В. Р. Теплопроводность нитрида галлия с кристаллической структурой типа вюрцита *(на английском языке)* 285

Маршалова Г. С., Баранова Т. А., Жукова Ю. В., Черный А. Д., Сухоцкий А. Б., Данильчик Е. С., Миرون А. А., Кадыров Р. А., Попов И. А. Численное исследование теплообмена и аэродинамического сопротивления аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой 298

Груданов В. Я., Ткачева Л. Т., Белохвостов Г. И., Бренч М. В., Пинчук А. А., Русских В. В. Влияние процессов утилизации энергии отработавших газов поршневых двигателей внутреннего сгорания на газодинамические и акустические характеристики глушителей шума 307

Попеску В. С., Василевич С. В., Балан М. М., Малай К. Л., Балан Т. В., Волконовичи О. Л. Эффективность процесса сушки масличных семян во взвешенном слое *(на английском языке)* 318

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

Козловский Д. И. Методы оценки точности позиционирования источника излучения при проведении брахитерапии 324

Жемжуров М. Л., Жмура Г. М., Рубин И. Е., Серебряный Г. З., Днепровская Н. М., Тетерева Н. А., Руденков И. В., Бабичев Л. Ф. Прогнозная оценка изменения объемов подлежащих глубинному захоронению радиоактивных отходов в активированных реакторных конструкциях в процессе их выдержки после окончательного останова энергоблоков Белорусской АЭС 332

CONTENTS**MATERIALS SCIENCES, METALLURGY**

- Peraschuk S.V., Volchek O.M., Prushak V.Ya.** Influence of the pressing temperature of halurgic potassium chloride on the operating conditions of the granulation plants 263

MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICS

- Volochko A.T., Yankovich S.N., Khrol I.N., Podorozhniaya I.V., Kalinovskij N.A.** Application of vibration diagnostics methods in the creating of elements of personal electric transport 269
- Rudenko S.P., Sandomirski S.G.** Calculation model of the stressed state of the tooth contact zone of surface-hardened gears 277

POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

- Volcheck V.S., Baranova M.S., Stempitsky V.R.** Thermal conductivity of wurtzite gallium nitride 285
- Marshalova G.S., Baranova T.A., Zhukova Yu. V., Chorny A.D., Sukhotsky A.B., Danil'chik E.S., Mironov A.A., Kadyrov R.G., Popov I.A.** Numerical simulation of heat transfer and hydraulic losses of air-cooled exhaust-shaft apparatuses 298
- Grudanov V.Ya., Tkacheva L.T., Belokhvostov G.I., Brench M.V., Pinchuk A.A., Russkikh V.V.** The influence of the processes of utilization of exhaust gases of reciprocating internal combustion engines on the gas dynamic and acoustic characteristics of noise silencers 307
- Popescu V.S., Vasilevich S.V., Balan M.M., Malai C.L., Balan T.V., Volconovici O.L.** The efficiency of the oilseed drying process in suspended layer 318

DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

- Kazlouski D.I.** Method for assessing the accuracy of source positioning during brachytherapy 324
- Zhemzhurov M.L., Zhmura G.M., Rubin I.E., Serebryany G.Z., Dneprovskaya N.M., Tetereva N.A., Rudenkov I.V., Babichev L.F.** Predictive evaluation of changes in the volumes of radioactive waste to be deeply positioned in activated reactor structures in the process of their storage after the final shutdown of the Belarusian NPP power units 332

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ
MATERIALS SCIENCES AND ENGINEERING, METALLURGY

UDC 622.788:622.363.2:662.8.055.3(045)
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-263-268>

Received 26.06.2022
Поступила в редакцию 26.06.2022

Siarhei V. Peraschuk¹, Olga M. Volchek², Viktor Ya. Prushak³

¹JSC “Belaruskali”, Soligorsk, Minsk Region, Republic of Belarus

²Baranovich State University, Baranovich, Brest Region, Republic of Belarus

³Soligorsk Institute of Resource Saving Problems with Pilot Production, Soligorsk, Minsk Region, Republic of Belarus

INFLUENCE OF THE PRESSING TEMPERATURE OF HALURGIC POTASSIUM CHLORIDE ON THE OPERATING CONDITIONS OF THE GRANULATION PLANTS

Abstract. The regularities of the influence of the pressing temperature in the roll compactors of halurgic fine-grained potassium chloride on the performance of the granulation process and the physical and mechanical properties of the granulate under the conditions of the Sylvinit Processing Plant of JSC “Belaruskali” are determined. It is shown that an increase in the pressing temperature from 120 °C to 142 °C significantly enhances the intensity of the processes of particles recrystallization and melt formation at the particles’ contact points in the zone of plastic deformation, which provides greater strength of inter-particle contact bonds due to the formation of additional bonds of the crystallization type. At the same time, the particle size distribution of the granulate practically does not change. Only a slight decrease in the dynamic strength of the granulate was revealed as a result of a small increase in the number of cavities and cracks in the granules, which is not critical for obtaining a high-quality finished product. In general, an increase in the pressing temperature of halurgic fine-grained potassium chloride up to 140–145 °C enables to enhance the capacity of granulation plants up to 130 % without reconstruction of existing production lines while maintaining the high strength and granulometric characteristics of finished products. At the same time, the switch to higher pressing temperatures requires solving the problem of intensive salt caking on the working surfaces of the rolls of roll compactors based on the technical modernization of the existing compacting plants, taking into account the recommendations developed.

Keywords: roll compactor, potassium chloride, granulate, pressure, pressing temperature

For citation: Peraschuk S. V., Volchek O. M., Prushak V. Ya. Influence of the pressing temperature of halurgic potassium chloride on the operating conditions of the granulation plants. *Vestsi Natsyyanal'nei akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 3, pp. 263–268. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-263-268>

С. В. Перещук¹, О. М. Волчек², В. Я. Прушак³

¹ОАО «Беларуськалий», Солигорск, Минская область, Республика Беларусь

²Барановичский государственный университет, Барановичи, Брестская область, Республика Беларусь

³Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством, Солигорск, Минская область, Республика Беларусь

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРЕССОВАНИЯ ГАЛУРГИЧЕСКОГО ХЛОРИСТОГО КАЛИЯ НА ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ ГРАНУЛЯЦИОННЫХ УСТАНОВОК

Аннотация. Установлены закономерности влияния температуры прессования в валковых прессах галургического мелкозернистого хлористого калия на производительность процесса гранулирования и физико-механические свойства гранулята в условиях сильвинитовой обогатительной фабрики ОАО «Беларуськалий». Показано, что увеличение температуры прессования со 120 до 142 °C существенно повышает интенсивность процессов рекристаллизации

частиц и образования расплава в местах контакта частиц в зоне пластической деформации, что обеспечивает большую прочность межчастичных контактных связей за счет образования дополнительных связей кристаллизационного типа. При этом фракционный состав гранулята практически не изменяется. Выявлено только незначительное снижение динамической прочности гранулята в результате небольшого увеличения количества трещин в гранулах, что не является критичным для получения качественного готового продукта. В целом увеличение температуры прессования галургического мелкозернистого хлористого калия до 140–145 °С позволяет без реконструкции существующих производственных линий повысить производительность грануляционных установок до 130 % при сохранении высоких прочностных и гранулометрических характеристик готовой продукции. При этом переход на более высокие температуры прессования требует решение проблемы интенсивного налипания соли на рабочих поверхностях валков валковых прессов на основе технической модернизации существующих установок прессования с учетом выработанных рекомендаций.

Ключевые слова: валковый пресс, хлористый калий, гранулят, давление, температура прессования

Для цитирования: Перещук, С. В. Влияние температуры прессования галургического хлористого калия на параметры работы грануляционных установок / С. В. Перещук, О. М. Волчек, В. Я. Прушак // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, № 3. – С. 263–268. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-263-268>

Introduction. The main method to obtain granular potash fertilizers is compacting the fine bulk material to produce a compacted strip of material (tiles), which is subsequently crushed and sent for screening to select the commercial fraction, which is a finished product (granulate). The method is based on the ability of bulk materials to be compacted under high pressure to form a stable dense structure of the substance due to the appearance of strong cohesive bonds between the particles. The method is performed using, as a rule, roll compactor by continuous feeding the material into the area between two counter-rotating smooth or profiled rolls. In general, the theoretical basis for determining the mechanical characteristics of the material while pressing (compacting) and the basic process flow diagrams and equipment have remained virtually unchanged over the last fifty years and are described in many papers [1–8]. It was found that the granules of potassium chloride obtained this way are polycrystals, and the compacting of potassium chloride, which, like all halogenides of alkali metals, has a high energy of the crystal lattice, is technologically difficult and energy consuming process. During the compacting process, numerous small defects are formed at the contact points of compacted grains, which are transformed by recrystallization processes into larger ones, forming a porous granule structure which largely determines its physical-mechanical and physical-chemical properties. The mechanical strength of polycrystals is determined primarily not by the strength of the crystals themselves but by the number and strength of interphase contacts between them.

At the same time, despite the detailed study of many important aspects of the granular potash fertilizers production, a number of provisions and recommendations require clarification, where one of the most important issues to be solved is the choice of the optimal temperature for compacting the charge in the roll compactor. This is particularly relevant for the process of obtaining granulate from fine halurgic potassium chloride. In the known sources this problem has not been studied at all. There was only some coverage of influence pattern of pressing temperature on physical and mechanical properties of granulate obtained by processing of flotation potassium chloride, and that mostly determined by laboratory studies [2, 7] and not adequately supported by the results of research under conditions of high-tonnage production. In addition, it should not be forgotten that the initial charge of halurgic fine-grained potassium chloride is significantly different in its physical, chemical and fractional composition from the charge of flotation origin, which, for example, has significantly more fine particles whose prevalence contributes to the formation of bonds between particles during their compaction based on Van der Waals forces [7]. Thus, the solution of problem regarding the choice of pressing temperature in roll compactors of halurgic fine-graded potassium chloride has an important applied meaning for Belarusian potash industry, because the Sylvinite Processing Plant of the Production Unit 4 of JSC “Belaruskali” (SPP 4 PU) has the large-capacity production of granular halurgic potassium chloride in the amount of up to 950 thousand tonnes per year, while the demand for such products in the world market grows constantly. The increase of the granulation plants capacity and the quality of the finished products will significantly enhance the competitiveness and the export potential of the Belarusian potash industry. Accordingly, the purpose of the paper presented was to investigate the influence of pressing temperature of halurgic fine-grained potassium chloride on the capacity of the granulation process and physical and mechanical properties of the granulate under conditions of JSC “Belaruskali” Processing Plant and to develop recommendations on improvement of the technological process.

Results and their discussion. The research was carried out in the potassium chloride granulation department of the Processing Plant PU 4, where the process of obtaining the granular product includes several process stages:

Stage 1: The dewatered charge consisting of the standard potassium chloride is fed from the thickening and centrifugation department to the drying and granulation department to fluid bed dryers for drying and heating. The product, heated to technological temperature, is then conveyed by a system of elevators and conveyors to three granulation plants;

Stage 2: The granulation plants compact the charge, crush and classify the oversize product to produce granulate of a commercial grade, which is sent to a granulate enrichment unit by a system of conveyors;

Stage 3: The granulate is further classified, moistened, scrubbed, dried, cooled and treated with reagents and then transported to finished product warehouse by a system of conveyors.

The research was carried out as part of technological stages 1 and 2 (production of granular product).

The research methodology involved measuring the operating parameters of the granulation equipment under three set modes of operation with temperatures in the shaft of the roll compactor at about 120 °C, 130, and 140 °C, respectively. For each mode of operation of the granulation plants their maximum capacity, physical and mechanical characteristics of the product obtained, as well as the effect of temperature on the change in the ratio of the formed flows of granulate, oversize and undersize product (retur) were evaluated. The process flow diagram of the equipment of the granulation plants being researched and of the main flows of the product is shown in the Figure 1.

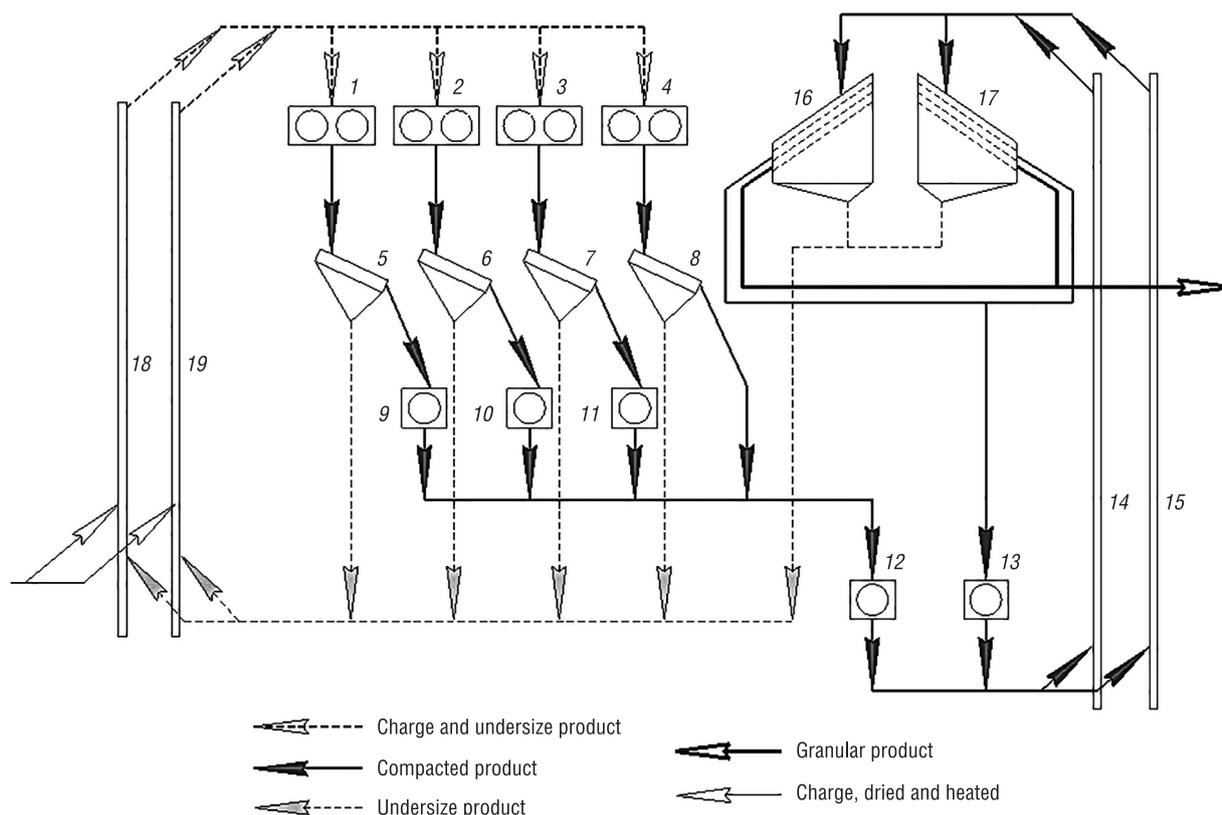


Figure 1. The process flow diagram of the granulation plant: 1–4 – roll compactors; 5–8 – roller screens; 9–11 – rotary crushers; 12 – impact crusher; 13 – hammer crusher; 14, 15, 18, 19 – bucket elevators; 16, 17 – three-product sieving machines

The temperature conditions of compacting were provided by changing the temperature of charge heating in fluidized bed furnaces within 130–160 °C in order to ensure the necessary temperature in the shafts of the roll compactors, taking into account the heat losses during transportation of material and mixing the undersize product from screens and sieving machines.

Each granulation plant includes (see Figure 1): roll compactors produced by JSC “Soligorsk Institute of Resource Saving Problems with Pilot Production”, type PVP (pos. 1–3) and roll compactor produced by Zemag Zeiz (pos. 4); fixed single deck roller screens (pos. 5–8) with bar screens; PSp1 000M type rotary pre-crushers (pos. 16, 17); Hazemag AP-SMA 1020 impact crusher (pos. 12); re-crushing hammer crusher of the type FAM-PHM 1012 MVD (pos. 13); bucket elevators (pos. 14, 15, 18, 19); three-product sieving machines type DF195 × 600/3 manufactured by Rhewum (pos. 20, 21).

The general picture of the granulate production process at the time of the research was as follows. The charge, dried and heated in fluidized bed furnaces at the process stage 1, was fed to a collecting scraper conveyor, and from there it was spread to the granulation plants. At each plant, the charge using the elevators, pos. 18, 19, and the distribution conveyor, located above the roll compactors, pos. 1–4, is distributed in the compactors’ shafts. The undersize product from the roller screens, pos. 5–8, and sieving machines, pos. 16, 17, was fed into the elevators. From the distributing conveyor the mixture of charge and undersize product was transported into the shafts of the roll compactors, pos. 1–4, through the electric cut-off valves. Four compactors were in continuous operation. In roll compactors the initial product was formed into a tile and a part of it came out as spillage. In the roller screens, pos. 5–8, the compacted product (oversize product) and the spillage (undersize product) were separated. The oversize product, most of which passed through the pre-crushers, pos. 9–11, was forwarded by means of a scraper conveyor to the impact crusher, pos. 12. From the latter, through the scraper conveyor and the elevators, pos. 14, 15, the crushed oversize product was fed to the three-product sieving machines, pos. 16, 17. The oversize product from the top and middle deck was re-crushed in the hammer crusher, pos. 13. The oversize product from the bottom deck (granulate) was transported to the enrichment unit. The undersize product from the bottom deck, together with the undersize product from the roller screens, pos. 5–8, was conveyed by means of the elevators, pos. 18, 19, and the scraper conveyors for re-compacting, as mentioned above. The working pressure in the hydraulic system of roll compactors of PVP type was maintained between 15.5–16.3 MPa in accordance with the set technological requirements. The working pressure in the hydraulic system of Zemag Zeiz roll compactors was maintained between 9.8–10.2 MPa.

Parameters of operation of granulation plants

Granulate output, t/h	Number of measurements	Temperature in the shaft of roll compactors, °C				Current of elevators’ drives, A			
		Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 5	Pos. 18	Pos. 19	Pos. 14	Pos. 15
65	1	141	140	140	135	46.5	37.9	52.0	59.7
	2	142	141	141	141	45.3	35.7	51.8	60.7
53	3	134	133	127	132	42.6	41.2	41.9	50.1
	4	134	134	127	133	43.4	40.9	41.5	51.7
49	5	120	113	119	121	55.3	51.3	44.7	52.2
	6	123	115	122	124	54.6	51.0	45.1	52.2

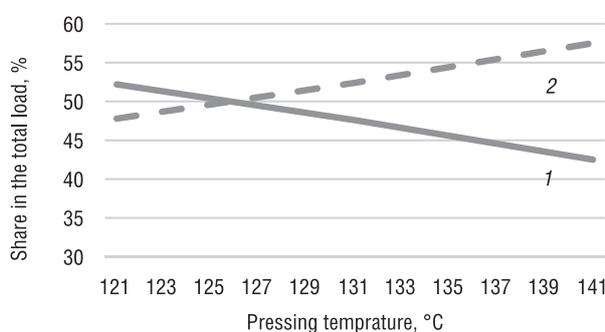


Figure 2. Change in the ratio of the relative share of the current loads of the elevators’ drives when the pressing temperature changes: curve 1 – relative share of the current load of the elevators’ drives feeding the undersize product with the charge; curve 2 – relative share of the current load of the elevators’ drives feeding the oversize product

The Table summarises the measurements results of granulation plants’ operating parameters, indicating the positions of the equipment as shown in the Figure 1.

The analysis of the equipment operating parameters presented in the table shows that with an increase in the pressing temperature, the output of granulate increases, i.e., the capacity of the plants increases. Thus, when we change the temperature in the shafts of the compactors from 121–124 to 140–142 °C, the output of granulate increases from 49 to 65 t/h. The reason for this allows us to set up the analysis of regularities of change in the ratio of drives’ currents of elevator groups, pos. 14, 15 and 18, 19, when changing the pressing temperatures, which are graphically presented in the Figure 2.

The analysis of the equipment operating parameters presented in the table shows that with an increase in the pressing temperature, the output of granulate increases, i.e., the capacity of the plants increases. Thus, when we change the temperature in the shafts of the compactors from 121–124 to 140–142 °C, the output of granulate increases from 49 to 65 t/h. The reason for this allows us to set up the analysis of regularities of change in the ratio of drives’ currents of elevator groups, pos. 14, 15 and 18, 19, when changing the pressing temperatures, which are graphically presented in the Figure 2.

The analysis of the equipment operating parameters presented in the table shows that with an increase in the pressing temperature, the output of granulate increases, i.e., the capacity of the plants increases. Thus, when we change the temperature in the shafts of the compactors from 121–124 to 140–142 °C, the output of granulate increases from 49 to 65 t/h. The reason for this allows us to set up the analysis of regularities of change in the ratio of drives’ currents of elevator groups, pos. 14, 15 and 18, 19, when changing the pressing temperatures, which are graphically presented in the Figure 2.

As you can see from this figure, with increasing the pressing temperature, the relative share of the current load of the elevators, pos. 18 and 19, decreases and that of elevators, pos. 14 and 15, increases. This indicates that with an increase in the pressing temperature compared to the total load on the roll compactor the output of the undersize product of the roll screens, pos. 5–8, and the sieving machine, pos. 16 and 17, decreases, and the output of the oversize fractions increases, which in turn indicates a corresponding increase in the quality of the tiles formed in the roll compactor, including their homogeneity. In our opinion, with increasing the pressing temperature within the investigated limits there is an increase in the intensity of recrystallization of particles described in the papers [2, 4–6]. In addition, at high temperatures and pressures the process of melt formation at the contact points of particles in the zone of plastic deformation begins to have a significant influence; as a result, the subsequent cooling of the oversize product provides greater strength of interparticle contact bonds through the formation of additional crystallization-type bonds, the possibility of which was pointed out in the paper [2]. Thus, an increase in pressing temperature of halurgic potassium chloride within the investigated limits significantly increases the capacity of granulation plants by reducing the volume of circulating load of non-compacted particles (retur) on the roll compactors.

In the course of the researches, we also studied the influence of changes in the pressing temperature on changes in the physical and mechanical properties of the granulate. It was found that by increasing the temperature in the shaft of the compactors from 121 °C to 142 °C, by the corresponding change in the amount of the granulate output, no significant changes in the physical and mechanical properties of the product are observed. At all operating modes the particle size distribution of the granulate coming to the enrichment stage had the following particle size distribution: 4 mm – 2.0–4.4 %; 3.15 mm – 34.0–34.9 %; 2.8 mm – 11.9–13.3 %; 2.0 mm – 43.8–49.2 %; 1.0 mm – 0.4–1.1 %; –1.0 mm – 0.7–1.1 %. Such indicators fully meet the requirements of industry and international standards (GOST 4568-95, Technical Specification of the Republic of Belarus (TU RB) 600122 610.010-2002, STO SPECS 001-98) applied to granular potash fertilizers.

Another important parameter of finished granular potash fertilizers is their dynamic strength, determined in accordance with the requirements of GOST 21 560.3-82 “Mineral Fertilizers. Methods for determination of dynamic strength and abrasive resistance”. In accordance with the requirements of the mentioned industry and international standards this indicator must be not less than 80–85 %. During the research it was found that with increasing the pressing temperature there was a slight decrease in the dynamic strength of granulate from 94 to 92 %, in our opinion, because of a slight increase in the number of cracks in the granules. At the same time, the identified decrease in the dynamic strength of the granulate is not critical for the quality of the finished product. However, this fact should be taken into account in further research and development of compacting modes at higher temperatures, above 145–150 °C, in the compactor’s shaft.

In general, the results of these researches have shown that one of the ways to increase the capacity of granulation plants for halurgic fine-grained potassium chloride is to increase the pressing temperature to at least 140–145 °C. In the process of research, however, a serious technical problem was discovered that limits the possibility of direct implementation of higher pressing temperatures in the technological process. Namely, at pressing temperatures above 130 °C, a very significant intensification of adhesive interaction between potassium chloride salts and working surfaces of the rolls occurs. Rather quickly the forming elements (cells) on the working surfaces of the rolls are filled with the compacted material. The rolls become practically smooth and covered by a layer of caked salt. This reduces the capacity of the compactor and increases the density of the tiles. There are several solutions to this problem. For example, as shown in some papers (patent RU 2014231 “Anti-adhesive lubrication of molds during the formation and production of products made of synthetic polymers”; patent RU 2 764 206 “A method for reducing the sticking of salts on the surface of roll press granulators”), salt caking can be eliminated by applying an anti-adhesion agent or water to the work surface of the rolls. We also suggest that the problem can be solved by reducing the temperature of the rolls’ surfaces using cooling liquids. In any case, the implementation of these methods requires modernisation of the existing compaction facilities. Therefore, it was decided to start corresponding design works on improvement of roll compactors of PVP type within the framework of the creative cooperation between specialists of JSC “Belaruskali” and JSC “Soligorsk Institute of Resource Saving Problems with Pilot Production”.

Conclusion. The regularities of the influence of the pressing temperature in the roll compactors of halurgic fine-grained potassium chloride on the performance of the granulation process and the physical and mechanical properties of the granulate under the conditions of the Silvinite Processing Plant of JSC “Belaruskali” are determined. It is shown that an increase in the pressing temperature from 120 to 142 °C significantly enhances the intensity of the processes of particle recrystallization and melt formation at the particles’ contact points in the zone of plastic deformation, which provides greater strength of interparticle contact bonds due to the formation of additional bonds of the crystallization type. Increase in the pressing temperature of halurgic fine-grained potassium chloride up to 140–145 °C enables to enhance the productivity of granulation plants up to 130 % using the existing production lines while maintaining the high strength and granulometric characteristics of finished products. The implementation of the compaction mode of halurgic fine-grained potassium chloride at the temperatures above 130 °C requires solving the problem of intensive salt caking on the working surfaces of the rolls of roll compactors based on the technical modernization of the existing compacting plants, taking into account the recommendations developed.

References

1. Belov V. N., Sokolov A. V. *Extraction and Processing of Potash Salts*. Leningrad, Khimiya Publ., 1971. 319 p. (in Russian).
2. Kochetkov V. N. *Granulation of Mineral Fertilizers*. Moscow, Khimiya Publ., 1975. 224 p. (in Russian).
3. Zubovich I. A. *Inorganic Chemistry*. Moscow., Vysshaya shkola Publ., 1989. 432 p. (in Russian).
4. Muradov S. G., Shomin I. P. *Obtaining Granular Fertilizers by Pressing*. Moscow, Khimiya Publ., 1985. 208 p. (in Russian).
5. Kuvshinnikov I. M. *Mineral Fertilizers and Salts: Properties and Ways to Improve Them*. Moscow, Khimiya Publ., 1987. 256 p. (in Russian).
6. Klassen P. V., Grishaev I. G., Shomin I. P. *Granulation*. Moscow, Khimiya Publ., 1991. 240 p. (in Russian).
7. Kondakov D. F. *Improvement of the Process of Granulation of Flotation Potassium Chloride from the Verkhnekamskoye Silvinite Deposit*. Moscow, 1998 (in Russian).
8. Prushak V. Ya., Kondratchik N. Y., Vysockaya N. A. Development of new technical solutions to increase the output of granular potassium chloride using roller presses. *Trudy BGTU. Seriya 2* [Proceedings of the Belarusian State Technical University. Series 2], 2020, no. 1, pp. 62–67 (in Russian).

Information about the authors

Siarhei V. Peraschuk – Deputy Chief Engineer for Technology, JSC “Belaruskali” (5, Korzh Str., 223710, Soligorsk, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: s.pereschuk@kali.by

Olga M. Volchek – Senior Lecturer, Baranovichi State University (21, Voikov Str., 225404, Baranovichi, Brest Region, Republic of Belarus). E-mail: leolya07@mail.ru

Viktor Ya. Prushak – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Technical Director, Soligorsk Institute of Resource Saving Problems with Pilot Production (69, Kozlov Str., 223710, Soligorsk, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: ipr@sipr.by

Информация об авторах

Перецук Сергей Викторович – заместитель главного инженера по технологии, ОАО «Беларуськалий» (ул. Коржа, 5, 223710, Солигорск, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: s.pereschuk@kali.by

Волчек Ольга Михайловна – старший преподаватель, Барановичский государственный университет (ул. Войкова, 21, 225404, Барановичи, Брестская область, Республика Беларусь). E-mail: leolya07@mail.ru

Прушак Виктор Яковлевич – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, технический директор, Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством (ул. Козлова, 69, 223710, Солигорск, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: ipr@sipr.by

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА
MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS

УДК 629.113:620.178
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-269-276>

Поступила в редакцию 27.01.2022
Received 27.01.2022

А. Т. Волочко¹, С. Н. Янкевич², И. Н. Хроль², И. В. Подорожня², Н. А. Калиновский²

¹Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
²ОАО «Приборостроительный завод Оптрон», Минск, Республика Беларусь

**ПРИМЕНЕНИЕ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ПРИ СОЗДАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ
ПЕРСОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА**

Аннотация. Проведено исследование вибронгруженности основных элементов персональных электрических транспортных средств и поиск путей снижения вибрационных характеристик. Рассмотрены вопросы измерения вибрации, возникающей на велосипеде, который приводится в движение мускульной силой человека и электроприводом. Измерения виброускорения и частотных спектров на определенном участке движения осуществлялись с помощью анализатора спектра «Октава-101ВМ» в три этапа. На первом этапе электровелосипед приводился в движение с помощью педального привода, на втором – электроприводом, на третьем – педали и электропривод работали параллельно. В результате проведенных испытаний установлено, что наибольшая вибрация происходила в режиме «Мотор» в процессе использования электровелосипеда, наименьшая вибрация – при езде с выключенным электроприводом. Обнаружено, что электропривод увеличивает уровень вибрации (при этом у электровелосипеда по всем осям не происходит превышения предельно допустимых значений уровней вибраций). С целью уменьшения возникающей от электродвигателя вибрации на персональном электротранспорте разработана компьютерная 3D-модель и изготовлен по данной модели на 3D-принтере безвоздушный колесный движитель (колесо для электросамоката с внутренним демпфированием). Стендовые испытания показали, что разработанное колесо в сравнении с пневматической шиной имеет меньшее (до 45 %) пятно контакта. Полученные результаты можно использовать при разработке конкурентоспособной продукции, в частности персонального электротранспорта.

Ключевые слова: электрическое транспортное средство, вибрация, вибронпряжение, колесо с внутренним демпфированием

Для цитирования: Применение вибродиагностики при создании элементов персонального электротранспорта / А. Т. Волочко [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, №3. – С. 269–276. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-269-276>

Alexander T. Volochko¹, Stsiapan N. Yankevich², Igor N. Khrol², Irina V. Podorozhniaya², Nikita A. Kalinovskij²

¹Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
²JSC “Instrument-Making Plant Optron”, Minsk, Republic of Belarus

**APPLICATION OF VIBRATION DIAGNOSTICS METHODS IN THE CREATING OF ELEMENTS
OF PERSONAL ELECTRIC TRANSPORT**

Abstract. The study of vibration loading of the main elements of personal electric vehicles and the search for ways to reduce vibration characteristics was conducted. The issues of measuring vibration arising on a bicycle, which is driven by human muscle power and an electric drive, are considered. Measurements of vibration acceleration and frequency spectra in a certain area of motion were carried out using the “Octave-101VM” spectrum analyzer in three stages. At the first stage, the electric bike was driven by a pedal drive, at the second – by an electric drive, at the third – the pedals and the electric drive worked in parallel. As a result of the tests carried out, it was found that the greatest vibration occurred in the “Motor” mode during the use of an electric bicycle, the least vibration occurred when driving with the electric motor turned off. It was found that the electric drive increases the vibration level (at the same time, the electric bike does not exceed the maximum permissible values of vibration levels on all axes). In order to reduce the vibration arising from the electric motor on a personal electric

vehicle, a 3D computer model has been developed and an airless wheel mover has been manufactured using this model on a 3D printer (a wheel for an electric scooter with internal damping has been manufactured). Bench tests have shown that the developed wheel, in comparison with a pneumatic tire, has a smaller (up to 45 %) contact spot. The results obtained can be used in the development of competitive products, in particular personal electric vehicles.

Keywords: electric vehicle, vibration, vibration voltage, wheel with internal damping

For citation: Volochko A. T., Yankovich S. N., Khrol I. N., Podorozhniaya I. V., Kalinovskij N. A. Application of vibration diagnostics methods in the creating of elements of personal electric transport. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 3, pp. 269–276 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-269-276>

Введение. В последнее время в связи с повышением стоимости топливных ресурсов возрос интерес к электрификации уже существующих конструкций индивидуальных средств передвижения, в частности велосипедов и самокатов. Внедрение транспорта на электрической тяге призвано увеличить расстояния передвижения в городской среде без ущерба для экологии, снизить стоимость эксплуатации по сравнению с транспортом, оборудованным двигателем внутреннего сгорания.

Основные тренды в проектировании и разработке конструкций персонального электротранспорта направлены на снижение массы изделия и повышения прочностных характеристик. Между тем компоненты персонального электротранспорта подвергаются изменяющимся во времени силовым воздействиям, в том числе вибрациям, что снижает комфортность поездки. Поэтому достоверное определение динамических характеристик (собственных частот и формы колебаний) конструкций персонального электротранспорта является первостепенным фактором при разработке конкурентоспособной продукции.

В литературных источниках имеются сведения о воздействии вибраций на сидение и человека [1], а также вибраций, вызванных элементами тормозной системы, трущихся пар и колесных шин [2–7].

Цель настоящей работы – изучение виброн нагруженности основных элементов персональных электрических транспортных средств и поиск путей снижения вибрационных характеристик.

Методика исследований. Экспериментальные исследования параметров вибраций (вибродеформации и вибронпряжения, перемещения, скорости, ускорения и частотные спектры) элементов конструкций обусловлена отсутствием на стадии предварительных расчетов сведений о характеристиках действующих нагрузок. Для определения воздействия вибрационной нагрузки проводились замеры виброускорения велосипеда. Испытания осуществляли в два этапа. На первом этапе проводился замер вибрации, возникающей на раме велосипеда, который приводился в движение: а) с помощью педального привода, б) электроприводом, в) педали и электропривод работали параллельно. Испытания осуществлялись на площадях ОАО «Приборостроительный завод Оптрон».

Виброускорение и частотные спектры измерялись с помощью анализатора спектра «Октава-101ВМ». Для определения локальной импульсной вибрации использовались малогабаритные пьезоэлектрические акселерометры. Их технические параметры отличаются надежностью и стабильностью, широкими частотными и динамическими диапазонами, линейными характеристиками в этих диапазонах, прочной конструкцией. Чувствительным элементом такого акселерометра является диск из пьезоэлектрического материала, который при растяжении, сжатии или сдвиге генерирует электрический заряд, пропорциональный воздействию силы.

Крепление преобразователя в настоящем испытании было выполнено стальным хомутом к раме велосипеда (рис. 1).

Значения третьоктавных весовых коэффициентов (поправок) для общей и локальной вибрации выбраны согласно ГОСТ 31 191.1-2004 (ИСО 2631-1:1997) «Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Часть 1: Общие требования». Корректированный по частоте уровень параметра вибрации (\bar{L}) представляет собой одночисловую характеристику на основе третьоктавного частотного анализа с последующим суммированием в частотной области с учетом числовых значений функций частотной коррекции и рассчитывался по выражению (ГОСТ 31 191.1-2004)

$$\bar{L} = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{0,1(L_{wi} + \Delta L_{wi})} \right), \quad (1)$$

где L_{wi} – октавные уровни параметра вибрации, дБ; ΔL_{wi} – октавные весовые поправки, дБ; i – порядковый номер октавной полосы; n – количество октавных полос.

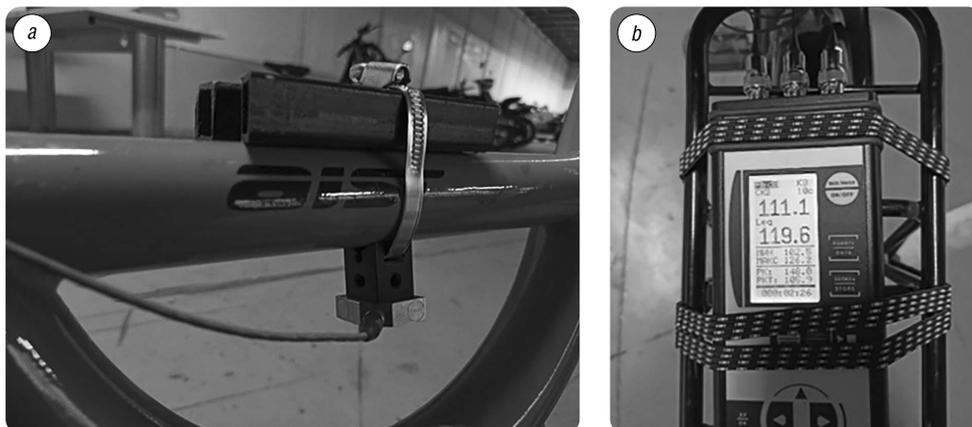


Рис. 1. Пример крепления анализатора спектра «Октава-101VM» с пьезоэлектрическим датчиком на велосипеде: *a* – крепление датчика, *b* – крепление анализатора спектра «Октава-101VM»

Fig. 1. Example of mounting the spectrum analyzer “Octave-101VM” with a piezoelectric sensor on a bicycle: *a* – mounting the sensor, *b* – mounting the spectrum analyzer “Octave-101VM”

Логарифмический уровень виброускорения (L_α , дБ) определялся непосредственно в третьоктавной полосе частот или по формуле (ГОСТ 31191.1-2004)

$$L_\alpha = 20 \lg \alpha / \alpha_0, \quad (2)$$

где α – среднеквадратичное значение виброускорения в третьоктавной полосе частот, м/с^2 ; α_0 – исходное (опорное) значение виброускорения, равное $3 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2$.

На втором этапе (после получения результатов по вибрационным испытаниям) разработана компьютерная 3D-модель и изготовлен по данной модели на 3D-принтере безвоздушный колесный движитель (колесо для электросамоката с внутренним демпфированием).

Испытание изготовленного колеса проводили на разработанном авторами стенде (рис. 2), который состоит из рамы 1, оснащенной статическим механизмом нормального осевого нагружения 2 испытуемого колеса. Платформа 3 может перемещаться как в нормальном направлении, так и осевом, и оснащена механизмом пружинного возврата в каждом направлении. Динамическое

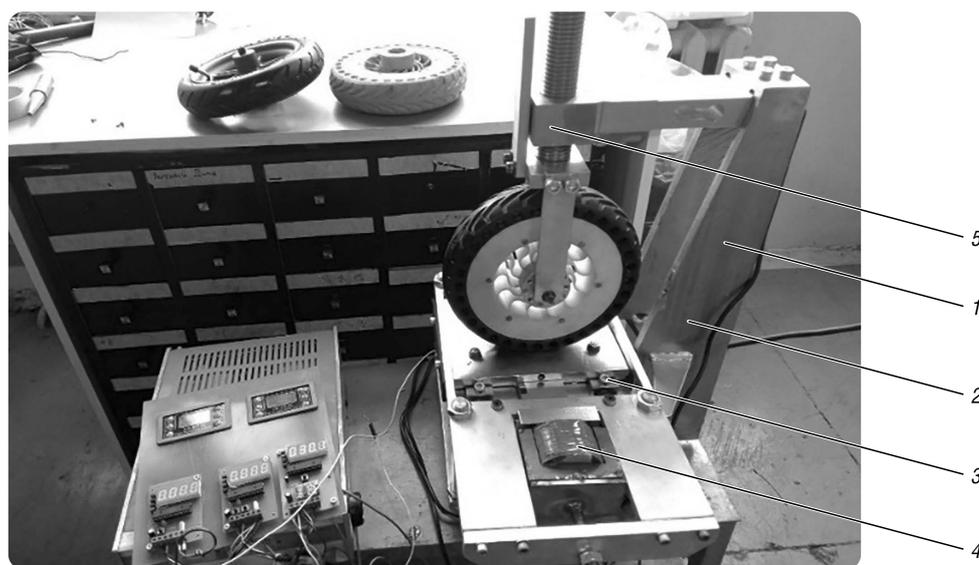


Рис. 2. Установка для проведения сравнительных стендовых испытаний: 1 – рама, 2 – статический механизм нормального осевого нагружения, 3 – платформа, 4 – электромагниты, 5 – тензометрический датчик

Fig. 2. Installation for comparative bench tests: 1 – frame, 2 – static mechanism of normal axial loading, 3 – platform, 4 – electromagnets, 5 – strain gauge

нагружение осуществляется за счет пары электромагнитов 4, расположенных во взаимно перпендикулярных направлениях и управляемых электронным блоком широтно-импульсной модуляции. Частота и амплитуда колебаний определяются инкрементными оптическими датчиками угла поворота и посредством кривошипных механизмов, преобразующих поступательные колебания платформы. Регистрация нагрузки на колесо осуществляется тензометрическим датчиком 5, установленным на кронштейне механизма статического нагружения в нормальном направлении. За счет отсутствия механической связи двух перпендикулярно расположенных колебательных механизмов имеется возможность оказывать вибрационные воздействия одновременно в двух направлениях с произвольной амплитудой и частотой с фиксированием параметров в режиме реального времени.

Для снижения издержек при прототипировании использована 3D-печать. При изготовлении опытных образцов применялась FDM-технология, которая обычно используется для печати изделий со сложной геометрией. Большинство исследований в области FDM-технологий сосредоточены на получении геометрической точности детали. Однако исследований, касающихся механических свойств конечного продукта, выполнено относительно немного. Вместе с тем данный метод позволяет получить огромное разнообразие структур и плотностей заполнения деталей, а следовательно, предоставляет пользователю эффективный инструмент для создания прототипов с заданными конструкторско-технологическими параметрами.

Выбор схемы нагружения обусловлен выполненным анализом нагруженности колеса электросамоката как стержневой системы.

В качестве материала для печати был использован PLA-пластик. Печать осуществлялась на 3D-принтере TEVO Michelangelo. Технологические параметры: диаметр сопла – 0,4 мм, скорость печати – 60 мм/с, температура печатающей головки – 220 °С; два наружных слоя твердого заполнения. Создание управляющей программы 3D-принтера проводилось с использованием программного обеспечения CURA.

Результаты исследований и их обсуждение. В ходе проведения исследований получены зависимости виброускорения от частоты при трех способах приведения в движение велосипеда (рис. 3). Установлено, что наибольшая вибрация в процессе использования электровелосипеда происходит в режиме «Мотор», наименьшая – при езде с выключенным электродвигателем. Спектр виброускорения содержит единственный пик в полосе частот от 0 до 20 Гц, далее вибрация постепенно убывает в область высоких частот.

Полученные авторами настоящей статьи результаты соотносятся с данными исследований [8–13], где источником низкочастотной вибрации выступило колесо, на котором крепился электродвигатель. В [8–13] имеются сведения, что низкочастотная вибрация оказывает отрицательное влияние на обменные процессы человека, что выражается в изменении углеводного, белкового, ферментного, витаминного и холестерина обмена, биохимических показателей крови.

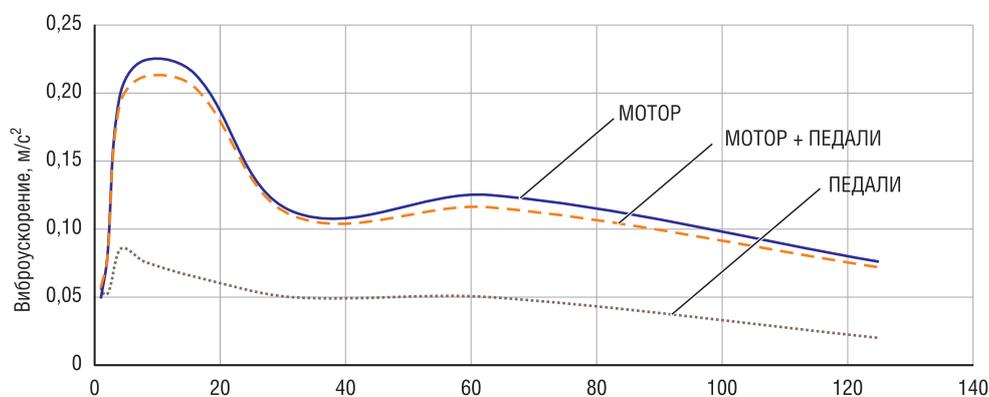


Рис. 3. Экспериментальные зависимости виброускорения от частоты при различных способах приведения в движение велосипеда

Fig. 3. Experimental dependences of vibration acceleration on frequency for various methods of driving a bicycle

Исходя из полученных результатов по замерам вибрации на легком персональном электротранспорте создана компьютерная модель с увеличенными демпфирующими свойствами колесного движителя. Авторами разработано безвоздушное колесо из пластика для электросамоката как самого компактного массового средства персонального электротранспорта. В безвоздушных шинах гибкие упругие элементы выполняют функции воздуха в пневматических шинах. Несущая способность безвоздушных шин в значительной мере определяется эксплуатационными характеристиками упругих элементов, и прежде всего радиальной жесткостью.

Реализацию внутреннего демпфирования проводили за счет оптимизации формы спиц безвоздушного колеса. В качестве приемлемого решения принято конструктивное исполнение спиц в виде витых пружин S-образной формы (рис. 4). Данное решение продиктовано необходимостью обеспечения боковой жесткости колеса при минимальном количестве деталей и узлов изделия. Применение витых пружин в подобных конструкциях ведет к необходимости наличия направляющих в конечном изделии. Вместе с тем благодаря своей форме плоские витые пружины выполняют функцию бокового ребра жесткости.

Моделирование напряжений, действующих на конструкцию движителя, проводилось с использованием программного комплекса SolidWorks. В результате создана расчетная модель с фиксированными посадочными размерами и свободными размерами геометрии спиц-демпферов (рис. 5). Для определения прочности были заданы статические и рабочие нагрузки, а также выполнен анализ деформированного состояния спиц обода в среде Simulation.

В качестве переменных параметров использовались толщина спицы H , а также радиусы $R1$ и $R2$, которые являются зависимыми от H и перестраиваются автоматически (см. рис. 4). Всего проанализировано 43 возможных сценария с параметрами оптимизации – напряжения во всех точках детали меньше предела текучести [14]. Максимальная деформация при заложенных нагрузках составила 4 мм без разрушений.

Согласно результатам моделирования, спицы обода испытывают преимущественно нагрузки на растяжение [14]. Поэтому для этой части детали следует использовать концентрический рисунок заполнения. Для корреляции данных с результатами моделирования было выбрано 100%-ное заполнение детали.

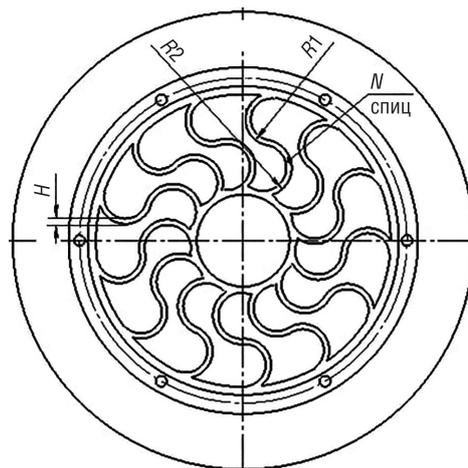


Рис. 4. Предлагаемая конструкция безвоздушного колеса

Fig. 4. Proposed airless wheel design

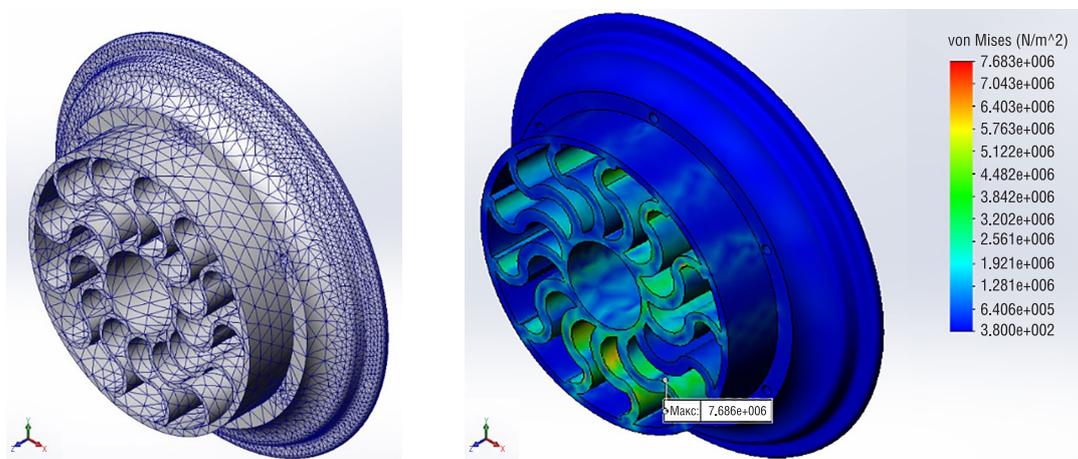


Рис. 5. Конечно-элементная модель безвоздушного колеса (а) и эпюра напряжений спиц обода (б)

Fig. 5. Finite element model of an airless wheel (a) and a stress diagram of the spokes of the rim (b)

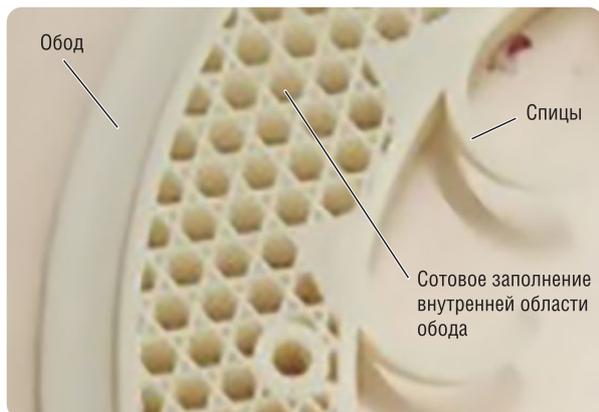


Рис. 6. Внутренняя структура обода колеса
Fig. 6. The internal structure of the wheel rim

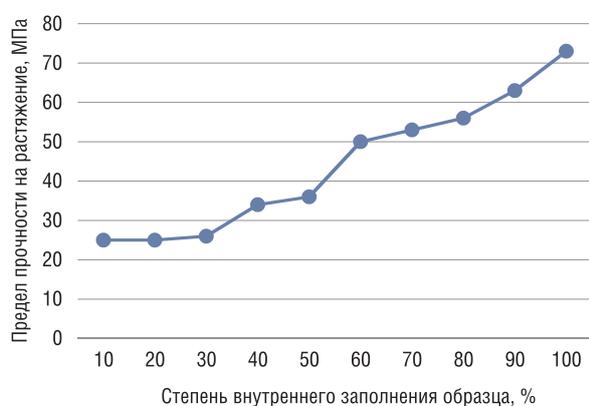


Рис. 7. Зависимость степени внутреннего заполнения образца от среднего значения предела прочности на растяжение

Fig. 7. Dependence of the degree of internal filling of the sample on the average value of the tensile strength

Коэффициент нормальной жесткости шины C_z является первой производной нормальной нагрузки колеса P_z по нормальному прогибу шины h_z [14] и определяется согласно выражению

$$C_z = \frac{\partial P_z}{\partial h_z}, \quad (3)$$

где h_z определяется как линейное смещение центра колеса относительно опорной поверхности под действием нормальной нагрузки, измеренное по нормали к опорной поверхности.

На рис. 8 представлена зависимость коэффициента нормальной жесткости от нагрузки. У пневматической шины при малых нагрузках коэффициент нормальной жесткости довольно высокий, после приложения нагрузки происходит его снижение за счет упругопластических деформаций в каркасе шины и уменьшения влияния внутреннего давления воздуха.

Снижение упругих деформаций безвоздушной шины (уменьшение коэффициента нормальной жесткости при больших нагрузках, рис. 8) связано с механическими свойствами структуры заполнения и геометрии изготовленного образца.

Закключение. Результаты вибрационных испытаний с различными вариантами привода велосипеда показали, что электропривод увеличивает уровень вибрации.

Установлено, что использование безвоздушного колеса существенно снижает негативное воздействие низкочастотного (до 20 Гц) уровня вибраций, что положительно влияет на комфорт и безопасность использования транспортного средства.

Обод колеса испытывает комплексные нагрузки сжатия-растяжения во время эксплуатации при знакопеременном нагружении. В соответствии с результатами испытаний для снижения неподрессоренных масс внутренняя область обода выполнена с неполным заполнением (60%), рисунок заполнения – шестигранник из треугольников (данный вид заполнения показал более высокие относительно других образцов показатели прочности как при испытаниях на растяжение, так и при испытаниях на сжатие) (рис. 6, 7).

Результаты стендовых испытаний приведены в таблице. Видно, что пятно контакта стандартного и безвоздушного колес существенно отличаются по площади в сторону увеличения ее у колеса с пневматической шиной (до 45%). Это происходит вследствие различия, причем существенного, физико-механических характеристик деформируемых тел: трехмерной эластичной оболочки, накачанной воздухом, и литой шины, у которых направления и зоны распространения деформаций, равно как и их величины, – различны.

При формировании пятна контакта пневматической шины (обычно в форме эллипса) каркас деформируется как в продольной плоскости, так и в поперечной за счет давления воздуха и соответствующего прогиба упругой оболочки шины. У безвоздушного колеса деформация периферии происходит по закону «ленты», в основном только в продольной плоскости за счет деформации изгиба.

Результаты сравнительных стендовых испытаний стандартного и безвоздушного колес
Results of comparative bench tests of standard and airless wheels

Параметр	Величина статической нагрузки					
	Колесо с пневматической шиной			Безвоздушное колесо		
	10 кг	30 кг	50 кг	10 кг	30 кг	50 кг
Площадь пятна контакта при нагрузке, мм ²	676	1354	1711	510	760	940
Площадь пятна контакта при нагрузке с поперечным смещением 5 мм, мм ²	811	1705	1760	914	1002	1256
Линейное смещение центра колеса, мм	1	4	7	3	6	7

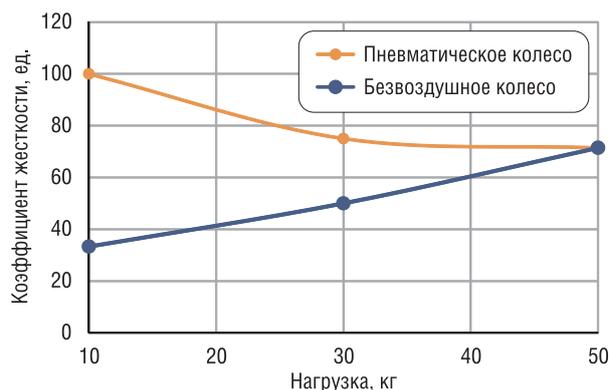


Рис. 8. Зависимость коэффициента нормальной жесткости от нагрузки стандартного и безвоздушного колес

Fig. 8. Dependence of the coefficient of normal stiffness on the load of standard and airless wheels

Разработка конечно-элементной модели и анализ эпюры напряжений обода колеса позволили оптимизировать и изготовить с применением 3D-печати колеса с внутренним демпфированием.

Результаты стендовых испытаний показали, что коэффициент нормальной жесткости у пневматической шины электросамоката достаточно высокий при малых нагрузках, а при ее увеличении до 50 кг сопоставим с разработанным безвоздушным колесом, которое имеет меньшее (до 45 %) пятно контакта.

Список использованных источников

1. Yoshida, J. Improvement of Bicycle Ride Comfort by Reduction of Seat Vibration / J. Yoshida, N. Kawagoe, T. Kawamura // *J. Syst. Design Dynamics*. – 2013. – Vol. 78, №792. – P. 2837–2847. <https://doi.org/10.1299/kikaic.78.2837>
2. A Robust Low Cost Device for Measuring Road Induced Vibrations / G. Mason [et al.] // *J. Sci. Cycling*. – 2016. – Vol. 5, №1. – P. 13–17.
3. An Experimental-Numerical Method for the Prediction of On-Road Comfort of City Bicycles / A. Doria [et al.] // *Vehicle System Dynamics: Int. J. Vehicle Mech. Mobility*. – 2021. – Vol. 59, №9. – P. 1376–1396. <https://doi.org/10.1080/00423114.2020.1759810>
4. Gogola, M. Analysing the Vibration of Bicycles on Various Road Surfaces in the Clity of Žilina / M. Gogola // *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*. – 2020. – Vol. 88, №92. – P. 77–97.
5. Redfield, R. Bike Braking Vibration Modelling and Measurement / R. Redfield // *The 2014 Conference of the International Sports Engineering Association: Procedia Engineering*. – 2014. – Vol. 72. – P. 471–476. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.051>
6. Evaluating the Cycling Comfort on Urban Roads Based on Cyclists’ Perception of Vibration / Jie Gao [et al.] // *J. of Cleaner Production*. – 2018. – Vol. 192. – P. 531–541. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.275>
7. Lépine, J. A Laboratory Excitation Technique to Test Road Bike Vibration Transmission / J. Lépine, Y. Champoux, J.-M. Drouet // *Experimental Techniques*. – 2016. – Vol. 40, №1. – P. 227–234. <https://doi.org/10.1007/s40799-016-0026-8>
8. Measurement of Dynamic Vibration in Cycling Using Portable Terminal Measurement System / Ning Xie [et al.] // *IET Intell. Transp. Syst.* – 2019. – Vol. 13, iss. 3. – P. 469–474. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2018.5181>
9. Olieman, M. Measurement of Dynamic Comfort in Cycling Using Wireless Acceleration Sensors / M. Olieman, R. Marin-Perianu, M. Marin-Perianu // *9th Conference of the International Sports Engineering Association (ISEA): Procedia Engineering*. – 2012. – Vol. 34. – P. 568–573. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.04.097>
10. Measuring Cycle Riding Comfort in Southampton Using an Instrumented Bicycle / S. Miah [et al.] // *6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*. – 2019. – P. 1–8. <https://doi.org/10.1109/MTITS.2019.8883328>
11. Lépine, J. Road Bike Comfort: on the Measurement of Vibrations Induced to Cyclist / J. Lépine, Y. Champoux, J.M. Drouet // *Sports Eng.* – 2014. – Vol. 17. – P. 113–122. <https://doi.org/10.1007/s12283-013-0145-8>
12. The dynamic response of the bicycle rider’s body to vertical, fore-and-aft, and lateral perturbations / G. Dialynas [et al.] // *Proc. IMechE. Part D: J. Automobile Eng.* – 2019. – Vol. 234, Iss. 7. – P. 1944–1957. <https://doi.org/10.1177/0954407019891289>
13. The effect of mountain bike suspensions on vibrations and off-road uphill performance / R. Faiss [et al.] // *J. Sports Med. Phys. Fitness*. – 2007. – Vol. 47, №2. – P. 151–158.
14. Янкевич, С.Н. Разработка и апробация методики проектирования демпфирующих элементов колес персонального электротранспорта с применением аддитивных технологий / С.Н. Янкевич, А.Т. Волочко // *Кузнечно-штамповочное производство, обработка материалов давлением*. – 2021. – №3. – С. 27–33.

References

1. Yoshida J., Kawagoe N., Kawamura T. Improvement of Bicycle Ride Comfort by Reduction of Seat Vibration. *Journal of System Design and Dynamics*, 2013, vol. 78, no. 792, pp. 2837–2847. <https://doi.org/10.1299/kikaic.78.2837>
2. Mason G., Larson M., Deng R., Reed D., Pahlmeyer M., Wright N., Wu Z. P., Yahata J. A Robust Low Cost Device for Measuring Road Induced Vibrations. *Journal of Science and Cycling*, 2016, vol. 5, no. 1, pp. 13–17.
3. Doria A., Marconi E., Munoz L., Polanco A., Suarez D. An Experimental-Numerical Method for the Prediction of On-Road Comfort of City Bicycles. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 2021, vol. 59, no. 9, pp. 1376–1396. <https://doi.org/10.1080/00423114.2020.1759810>
4. Gogola M. Analysing the Vibration of Bicycles on Various Road Surfaces in the City of Žilina. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*, 2020, vol. 88, no. 92, pp. 77–97.
5. Redfield R. Bike Braking Vibration Modelling and Measurement. *The 2014 Conference of the International Sports Engineering Association: Procedia Engineering*, 2014, vol. 72, pp. 471–476. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.051>
6. Gao J., Sha A., Huang Y., Hu L., Tong Zh., Jiang W. Evaluating the Cycling Comfort on Urban Roads Based on Cyclists' Perception of Vibration. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 192, pp. 531–541. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.275>
7. Lépine J., Champoux Y., Drouet J.-M. A Laboratory Excitation Technique to Test Road Bike Vibration Transmission. *Experimental Techniques*, 2016, vol. 40, no. 1, pp. 227–234. <https://doi.org/10.1007/s40799-016-0026-8>
8. Ning Xie, Hui Li, Wenzhong Zhao, Ying Ni, Chenwen Liu, Yi Zhang, Zhigang Xu. Measurement of Dynamic Vibration in Cycling Using Portable Terminal Measurement System. *IET Intelligent Transport Systems*, 2019, vol. 13, no. 3, pp. 469–474. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2018.5181>
9. Olieman M., Marin-Perianu R., Marin-Perianu M. Measurement of Dynamic Comfort in Cycling Using Wireless Acceleration Sensors. *9th Conference of the International Sports Engineering Association (ISEA): Procedia Engineering*, 2012, vol. 34, pp. 568–573. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.04.097>
10. Miah S., Kaparias I., Ayub N., Milonidis E., Holmes W. Measuring Cycle Riding Comfort in Southampton Using an Instrumented Bicycle. *6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, 2019, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/MTITS.2019.8883328>
11. Lépine J., Champoux Y., Drouet J.M. Road Bike Comfort: on the Measurement of Vibrations Induced to Cyclist. *Sports Engineering*, 2014, vol. 17, pp. 113–122. <https://doi.org/10.1007/s12283-013-0145-8>
12. Dyalynas G., W de Haan J., Schouten A. C., Happee R., Schwab A.L. The dynamic response of the bicycle rider's body to vertical, fore-and-aft, and lateral perturbations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2019, vol. 234, iss. 7, pp. 1944–1957. <https://doi.org/10.1177/0954407019891289>
13. Faiss R., Praz M., Meichtry A., Gobelet C., Deriaz O. The effect of mountain bike suspensions on vibrations and off-road uphill performance. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 2007, vol. 47, no. 2, pp. 151–158.
14. Yankevich S. N., Volochko A. T. Development and approbation of a methodology for designing damping elements of wheels of personal electric transport using additive technologies. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo, obrabotka materialov davleniem = Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*, 2021, no. 3, pp. 27–33 (in Russian).

Информация об авторах

Волочко Александр Тихонович – доктор технических наук, профессор, начальник отдела, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: volochkoat@mail.ru

Янкевич Степан Николаевич – начальник научно-исследовательского отдела ОАО «Приборостроительный завод Оптрон» (ул. Ф. Скорины, 52, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nio@optron.by

Хроль Игорь Николаевич – научный сотрудник, ОАО «Приборостроительный завод Оптрон» (ул. Ф. Скорины, 52, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: igor_aspirant_fmm@mail.ru

Подорожня Ирина Викторовна – научный сотрудник, ОАО «Приборостроительный завод Оптрон» (ул. Ф. Скорины, 52, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: iaya@tut.by

Калиновский Никита Александрович – младший научный сотрудник, ОАО «Приборостроительный завод Оптрон» (ул. Ф. Скорины, 52, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kirillf57@gmail.com

Information about the authors

Alexander T. Volochko – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volochkoat@mail.ru

Stsiapan N. Yankevich – Head of the Scientific Department, JSC “Instrument-Making Plant Optron” (52, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nio@optron.by

Igor N. Khrol – Researcher, JSC “Instrument-Making Plant Optron” (52, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: igor_aspirant_fmm@mail.ru

Irina V. Podorozhniaya – Researcher, JSC “Instrument-Making Plant Optron” (52, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: iaya@tut.by

Nikita A. Kalinovskij – Junior Researcher, JSC “Instrument-Making Plant Optron” (52, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kirillf57@gmail.com

*К 65-летию Объединенного института машиностроения
Национальной академии наук Беларуси*

С. П. Руденко, С. Г. Сандомирский

*Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

**РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЗОНЫ КОНТАКТА ЗУБЬЕВ
ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС**

Аннотация. Рассмотрено напряженное состояние поверхностного слоя в зоне контакта сопряженных зубьев цилиндрических зубчатых колес, которое характеризуется не только поверхностными, но и глубинными эквивалентными напряжениями. Показано, что при контактном нагружении напряженное состояние поверхностного слоя неоднородное и зависит от расстояния от поверхности. Выполнены анализ и обоснование расчетной модели напряженного состояния диффузионного слоя в зоне контакта сопряженных зубьев поверхностно упрочненных зубчатых колес. Уточнено значение коэффициента, учитывающего влияние нормальных напряжений на эффективность касательных. Достоверность и обоснованность модели расчета напряженного состояния поверхностного слоя в зоне контакта сопряженных зубьев поверхностно упрочненных зубчатых колес оценивали по результатам натурных стендовых испытаний зубчатых передач, изготовленных из цементуемой стали 20ХГНР. Значения контактных напряжений в полюсе зацепления зубьев корректировали с учетом концентрации нагрузки по ширине зубчатого венца. Глубину выкрашивания поврежденных зубьев определяли путем замеров слепков, снятых с зубьев каждой исследованной шестерни с использованием метакриловой смолы. Установлено, что зона зарождения глубинного контактного выкрашивания для шестерен с модулем 6,5 мм находится на глубине залегания расчетных максимальных эквивалентных касательных напряжений. Согласованность результатов расчета с экспериментальными данными показывает обоснованность применения расчетной модели напряженного состояния для эвольвентных зубчатых колес.

Ключевые слова: зубчатые колеса, поверхностное упрочнение, напряженное состояние поверхностного слоя, неоднородность, аналитическая модель

Для цитирования: Руденко, С. П. Расчетная модель напряженного состояния зоны контакта зубьев поверхностно упрочненных зубчатых колес / С. П. Руденко, С. Г. Сандомирский // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, №3. – С. 277–284. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-277-284>

*To the 65th Anniversary of the Joint Institute of Mechanical Engineering
of the National Academy of Sciences of Belarus*

Sergei P. Rudenko, Sergei G. Sandomirski

Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences, Minsk, Republic of Belarus

CALCULATION MODEL OF THE STRESSED STATE OF THE TOOTH CONTACT ZONE OF SURFACE-HARDENED GEARS

Abstract. Stress state of the surface layer in the contact zone of mating teeth of cylindrical gears has been studied. It is established that stressed state of contact surfaces in the meshing pole of mating teeth is characterized not only by surface contact stresses, but also by deep equivalent stresses. It is shown that under contact loading the stressed state of surface layer is heterogeneous and changes with distance from the surface. Analysis and substantiation of calculation model for stressed state of diffusion layer in contact zone of mating teeth of surface-hardened gears are performed. Value of coefficient, which takes into account influence of normal stresses on efficiency of tangential ones, is specified. Reliability and validity of model of calculation of stressed condition of surface layer in contact zone of mating teeth of surface-hardened gears were estimated according to results of full-scale bench tests of the gears made of cemented steel 20XGHP. The values of contact stresses in

tooth meshing pole were corrected considering the load concentration across the width of cogged ring gear. Spalling depth of damaged teeth was determined by measuring impressions taken from the teeth of each examined gear with methacrylic resin. It is established that the nucleation zone of deep contact pitting for gears with 6.5 mm module is on the depth of occurrence of calculated maximum equivalent shear stresses. The consistency of the calculation results with the experimental data shows the validity of the calculated stress-strain model for involute gears.

Keywords: gears, surface hardening, surface layer stress state, heterogeneity, analytical model

For citation: Rudenko S. P., Sandomirski S. G. Calculation model of the stressed state of the tooth contact zone of surface-hardened gears. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 3, pp. 277–284 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-277-284>

Введение. Исследования и расчеты сопротивления контактной усталости (контактной прочности) зубчатых передач направлены на изучение факторов, обуславливающих усталостные процессы при контактном нагружении и влияющих на контактную прочность деталей машин [1–9]. Установлено, что напряженное состояние контактирующих поверхностей в полюсе зацепления сопряженных зубьев характеризуется не только поверхностными контактными напряжениями, но и глубинными эквивалентными напряжениями [6, 7, 9]. Наши исследования подтверждают данные результаты [10–13]. Получено, что при определенных условиях глубинные эквивалентные напряжения вызывают прогрессирующее выкрашивание поверхностей зубьев – отслаивание, то есть большое по глубине и площади выкрашивание, которое, зародившись в зоне полюса зацепления, имеет тенденцию распространяться в однопарной зоне активных поверхностей зубьев.

Большое научное и практическое значение имеют теоретические и экспериментальные исследования Р. Р. Гальпера [6] и Е. И. Тескера [9], которые посвящены решению контактной задачи по всей толщине поверхностно упрочненного слоя материала зубчатых колес. Они позволяют установить зависимость между расположением опасной зоны, в которой могут возникать очаги контактных разрушений, и механическими свойствами материала, действующими контактными нагрузками с оценкой запаса прочности в этой зоне. Но расчетная оценка сопротивления контактной усталости поверхностно упрочненных зубчатых колес требует дальнейшего развития. В частности, расчет на предотвращение глубинного контактного разрушения азотированных зубчатых колес ограничен сравнением допускаемых и расчетных напряжений, действующих на границе диффузионного слоя и сердцевины [7]. При этом допускаемые напряжения ставятся в зависимость только от прочности сердцевины. Методика расчета поверхностно упрочненных зубчатых колес, приведенная в [9], основана не на диаграммах контактной усталости, а на линейной зависимости предельных касательных напряжений от твердости. Но базовые числа циклов кривых усталости при поверхностных и глубинных разрушениях значительно отличаются. Поэтому использование одного и того же значения расчетного контактного напряжения для поверхности и в глубине материала не оправданно [13]. Кроме того, недостаточный объем экспериментальных данных приводит к противоречивости информации о напряженном состоянии поверхностных слоев зубьев [14].

На практике часто ставится задача не только оценки ресурса зубчатых передач, обеспечиваемого сопротивлением глубинной контактной усталости поверхностно упрочненных зубчатых колес, но и определения качественных параметров упрочненных слоев, обеспечивающих бездефектную работу зубчатой передачи в течение заданного срока. При решении этой задачи существенное значение имеет характер напряженного состояния и распределение напряжений в детали, допустимость того или иного напряженного состояния для обеспечения прочности изделия [15].

Цель работы – анализ и обоснование расчетной модели напряженного состояния диффузионного слоя в зоне контакта сопряженных зубьев поверхностно упрочненных зубчатых колес.

Теоретический анализ. В настоящее время в методиках расчета эвольвентных цилиндрических передач используют основные положения теории контактных деформаций, полученные Г. Герцем [16]. При этом принимают ряд допущений, связанных с отличием условий работы сопряженных зубьев зубчатых колес от классических положений теории Г. Герца. При расчете эвольвентных цилиндрических передач допускают, что в каждой точке зацепления зубья можно заменить прямыми круговыми цилиндрами с параллельными осями, радиусы кривизны которых равны радиусам кривизны эвольвенты в точке контакта [15, 16]. Под действием сжимающих нагру-

зок зубья соприкасаются по узкой полосе (площадке), ограниченной двумя прямыми. Нормальные давления поперек площадки, величина которых является необходимой частью расчета на выносливость рабочей поверхности зубьев, определяются известным выражением [15–17]

$$\sigma = \sigma_H \sqrt{1 - (y/b)^2}, \tag{1}$$

где σ_H – наибольшее давление на контактной площадке, которое связано с нагрузкой w_t на единицу длины цилиндра и величиной b малой полуоси контурного эллипса площадки контакта зависимостью [16]

$$\sigma_H = \frac{2w_t}{\pi b}. \tag{2}$$

При работе зубчатых передач нагрузка на боковых поверхностях зубьев меняется по величине, оставаясь постоянной по знаку. Многократное периодическое изменение во времени напряженного состояния рабочей поверхности зубьев вызывает образование и дальнейшее развитие трещин усталости (рис. 1, а).

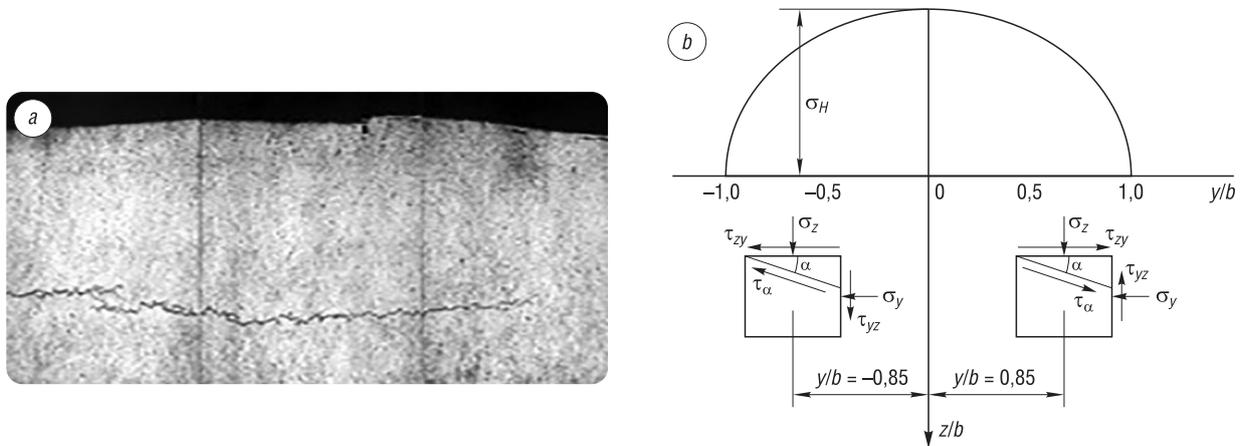


Рис. 1. Вид подповерхностной трещины зуба шестерни с модулем 6,5 мм (а) и напряженное состояние при контакте цилиндров (b)

Fig. 1. View of the subsurface crack of the gear tooth with a module of 6.5 mm (a) and stress state at contact of cylinders (b)

Для оценки сопротивления усталости поверхностно упрочненных зубчатых колес в реальных условиях необходимо знать не только наибольшее давление на площадке контакта, но и характеристики напряженного состояния рабочего объема материала по толщине упрочненного слоя, особенно в критических зонах, где могут возникнуть усталостные разрушения.

Из прикладной теории упругости известно [15], что контактное нагружение цилиндров вызывает в материале объемное напряженное состояние, характеризуемое нормальными сжимающими (σ_x , σ_y , σ_z) и касательными (τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx}) напряжениями (рис. 1, b). Кроме нормальных давлений на поверхности площадки контакта действует касательная нагрузка от сил трения. Учитывая [17], что при значениях коэффициента трения в контакте, характерных для зубчатых передач, касательная нагрузка не оказывает влияние на напряженное состояние на глубине материала $z/b \geq 0,2$, компоненты напряженного состояния в произвольной точке с координатами (y, z) имеют следующий вид [15, 16]:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= -\sigma_H 2\mu \frac{z}{b} \left[\sqrt{\frac{b^2 + \lambda}{\lambda}} - 1 \right], \quad \sigma_y = -\sigma_H \frac{z}{b} \left[\sqrt{\frac{b^2 + \lambda}{\lambda}} \left(2 - \frac{b^2 z^2}{\lambda^2 + b^2 z^2} \right) - 2 \right], \quad \sigma_z = -\sigma_H \frac{b z^3}{\lambda^2 + b^2 z^2} \sqrt{\frac{b^2 + \lambda}{\lambda}}; \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} &= -\sigma_H \frac{b y z^2}{\lambda^2 + b^2 z^2} \sqrt{\frac{\lambda}{b^2 + \lambda}}, \quad \tau_{zx} = \tau_{xz} = 0, \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = 0, \end{aligned} \tag{3}$$

где λ – наибольший корень уравнения $y^2 / (b^2 + \lambda) + z^2 / \lambda = 1$.

В [18] показано, что касательные напряжения и величина отношения τ_{yz}/HV (HV – твердость по шкале Виккерса) являются основным фактором, который определяет глубину зоны зарождения трещины, вызывающей глубинное контактное выкрашивание поверхностного слоя шестерен.

В общем случае при циклических контактных нагрузках следует рассматривать напряженное состояние и характер изменения подповерхностных напряжений во всем объеме напряженного контакта (см. рис. 1, *b*). В этом случае касательные τ_α и нормальные σ_α напряжения на площадках, проходящих через точку с координатой z_0 и наклоненных под углом α к оси y , определяются следующим образом [16]:

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_z - \sigma_y}{2} \cdot \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cdot \cos 2\alpha; \quad \sigma_\alpha = \frac{\sigma_z + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_z - \sigma_y}{2} \cdot \cos 2\alpha - \tau_{xy} \cdot \sin 2\alpha. \quad (4)$$

В процессе перекачивания цилиндров меняется относительная координата точки y_0 , а следовательно, и напряжения τ_α и σ_α . На рис. 2 представлены кривые изменения относительного касательного напряжения τ_α/σ_H для точек, залегающих на глубине $z/b = 0,5$. На площадках, расположенных под углами $\alpha = 0^\circ$ и 90° , напряжения τ_α изменяются по симметричному циклу, а под углом $\alpha = 45^\circ$ и на остальных площадках – по асимметричному.

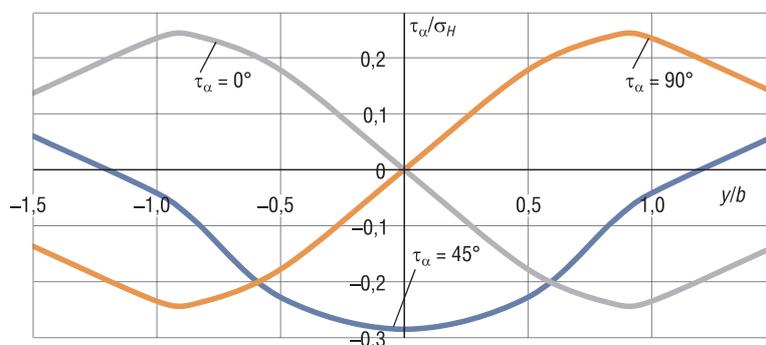


Рис. 2. Изменение касательных напряжений на площадках, расположенных под углом α к оси y при $z/b = 0,5$

Fig. 2. Change of tangential stresses at the sites located at an angle α to the y -axis at $z/b = 0.5$

Определение допустимости того или иного напряженного состояния с точки зрения прочности изделия основано на применении гипотез пластичности и прочности. Для пластичных материалов наиболее распространенными являются гипотеза наибольших касательных напряжений и гипотеза потенциальной энергии формоизменения (средних касательных напряжений). При оценке контактной прочности пластичных и хрупких материалов многочисленными экспериментальными данными подтверждена гипотеза эквивалентных касательных напряжений [7, 9, 15], согласно которой момент наступления предельного состояния (развитие глубинной контактной усталости поверхностных слоев) обусловлен способностью материала сопротивляться как касательным, так и нормальным напряжениям. В этом случае имеющиеся данные позволяют при напряженном состоянии с преобладающими касательными напряжениями, когда они ответственны за усталостные разрушения, принять гипотезу Геста–Мора [7], согласно которой сопротивление усталости материала определяется эквивалентными касательными напряжениями τ_e , отражающими влияние нормальных напряжений σ_α на площадке действия касательных напряжений τ_α в данной точке:

$$\tau_e = |\tau_\alpha| - k|\sigma_\alpha|, \quad (5)$$

где k – коэффициент, определяемый экспериментально.

Результаты расчета по формуле (5) показывают, что эквивалентные касательные напряжения имеют максимальные значения на площадках, параллельных и перпендикулярных площадке контакта ($\alpha = 0^\circ$ и 90°), расположенных на глубине $z/b = 0,4–0,8$ при $y/b = \pm 0,85$, что согласуется с результатами исследований [16]. Причем напряжения на площадках с $\alpha = 90^\circ$ выше, чем с $\alpha = 0^\circ$ (рис. 3).

Так как расчет зубчатых передач на прочность производится по наибольшей величине эквивалентного напряжения, то анализ напряженного состояния площадки контакта с применением формул (3) и (5) показывает, что на площадках, перпендикулярных площадке контакта ($\alpha = 90^\circ$), главные напряжения τ_α совпадают по абсолютной величине, но противоположны по знаку с напряжениями τ_{yz} , а главные напряжения σ_α совпадают по величине и знаку с напряжениями σ_y . Учитывая эти данные, применим теорию прочности Геста–Мора для напряженного состояния, описываемого уравнениями (3) для компонентов τ_{yz} и σ_y :

$$\tau_e = \left| \tau_{yz} \right| - k \left| \sigma_y \right|. \quad (6)$$

Расчет эквивалентных касательных напряжений τ_e по формулам (5) и (6) показал, что они равны по абсолютной величине на площадках, перпендикулярных площадке контакта ($\alpha = 90^\circ$). Следовательно, с целью упрощения расчетов для определения напряжений τ_e целесообразно применять формулу (6).

Экспериментальные исследования и результаты. Достоверность и обоснованность модели расчета напряженного состояния поверхностного слоя в зоне контакта сопряженных зубьев поверхностно упрочненных зубчатых колес оценивали по результатам экспериментальных исследований в рамках натурных стендовых испытаний зубчатых передач с модулем 6,5 мм, изготовленных из цементуемой стали 20ХГНР (ГОСТ 4543–2016). Зубчатые колеса, подвергнутые химико-термической обработке (цементация, закалка и низкий отпуск), испытывали при контактных напряжениях в полюсе зацепления 2000–2200 МПа. Для установления причин контактных повреждений и разрушений зубчатых колес после стендовых испытаний были проведены металлографические и дюрOMETрические исследования упрочненных слоев образцов испытанных шестерен. За критерий достоверности модели расчета принималось соответствие глубины контактного выкрашивания испытанных шестерен с глубиной залегания максимальных эквивалентных касательных напряжений.

Особое внимание при анализе результатов испытаний уделяли определению твердости и качества структуры диффузионных слоев на определенном расстоянии от поверхности зубьев в зоне с максимальными величинами эквивалентных касательных напряжений, рассчитываемых согласно уравнению (6) по всей толщине диффузионного слоя. При расчете учитывали неоднородность упрочненных диффузионных слоев, обусловленную градиентом твердости после химико-термического упрочнения, путем варьирования значениями коэффициента k , который учитывает влияние нормальных напряжений на эффективность касательных. Для зон диффузионного слоя с твердостью 550 HV 0,2 и менее принимали $k = 0,25$ [7], для зон с твердостью выше 550 HV 0,2 для определения величины k предложена зависимость $k = 0,0013 \text{ HV} - 0,5331$ (рис. 4).

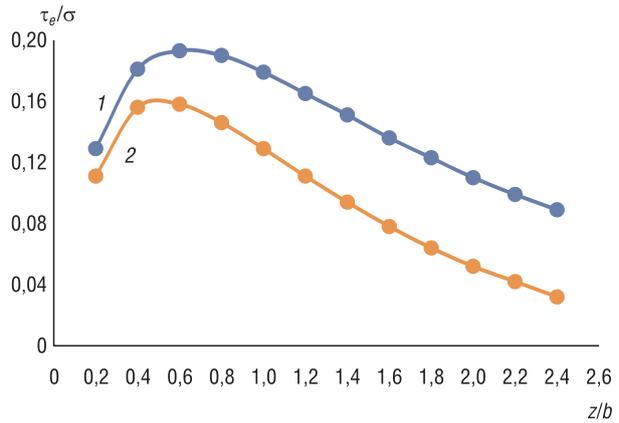


Рис. 3. Изменение относительных эквивалентных напряжений τ_e/σ_H в зависимости от глубины z/b упрочненного слоя: 1 – для площадок с $\alpha = 90^\circ$; 2 – для площадок с $\alpha = 0^\circ$
 Fig. 3. Change of the relative equivalent stress τ_e/σ_H depending on the depth z/b of the hardened layer: 1 – for areas with $\alpha = 90^\circ$; 2 – for areas with $\alpha = 0^\circ$

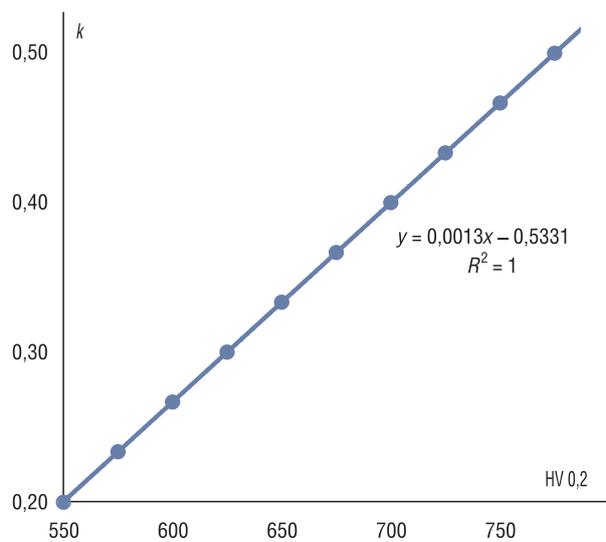


Рис. 4. Зависимость коэффициента k от твердости HV 0,2 диффузионного слоя
 Fig. 4. Dependence of the coefficient k on the hardness HV 0.2 of the diffusion layer

Финишной обработкой испытуемых шестерен являлась химико-термическая, поэтому степень точности изготовления зубчатых колес была невысокой и составляла 10–11 по нормам кинематической точности по ГОСТ 1643–81. Это обусловило нестабильность пятна контакта в зацеплении и неоднородность концентрации нагрузки по длине зуба при испытании разных пар. Для уточнения концентрации нагрузки в зубчатом зацеплении была определена величина коэффициента $K_{H\beta}$, учитывающего неравномерность распределения нагрузки по ширине венца для всех испытанных зубчатых пар:

$$K_{H\beta} = 1 + (K_{H\beta}^0 - 1) \cdot K_{HW}, \quad (7)$$

где $K_{H\beta}^0$ – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки по ширине венца в начальный период работы передачи; K_{HW} – коэффициент, учитывающий приработку зубьев.

Для цементуемых зубчатых колес первоначальная неравномерность распределения нагрузки по ширине венца с течением времени практически не изменяется, поскольку колеса с твердыми поверхностями зубьев практически не прирабатываются [19]. Поэтому коэффициент $K_{HW} = 1$, а формула (7) принимает вид: $K_{H\beta} = K_{H\beta}^0$.

Коэффициент $K_{H\beta}^0$ определяли в соответствии с рекомендациями ГОСТ 21 354–75:

$$K_{H\beta}^0 = 1 + \frac{0,4 \cdot b_w \cdot \gamma_{\Sigma} \cdot G_t}{w_{Hm}} + 0,14 \left(\frac{b_w}{d_w} \right)^2, \quad (8)$$

где G_t – суммарная жесткость сопряженных зубьев, $G_t = 14$ ГПа; w_{Hm} – удельная расчетная окружная сила, Н/мм; b_w – рабочая ширина зубчатого венца, мм; d_w – диаметр начальной окружности, мм; γ_{Σ} – суммарный угол между проекциями осей зубчатых колес на плоскость зацепления, рад:

$$\gamma_{\Sigma} = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{b_w} = \frac{\Delta \delta}{b_w}, \quad (9)$$

где Δ_1 и Δ_2 – величины износа по краям рабочей ширины шестерни b_w , мм.

Подставив выражение (9) в (8) и выразив удельную расчетную окружную силу w_{Hm} через крутящий момент на шестерне T_H [Нм], получим окончательно выражение для $K_{H\beta}$:

$$K_{H\beta} = 1 + \frac{0,4 \cdot b_w \cdot d_w \cdot \Delta \delta \cdot G_t}{2000 \cdot T_H} + 0,14 \left(\frac{b_w}{d_w} \right)^2. \quad (10)$$

Величины износа Δ_1 и Δ_2 , входящие в выражение (9), определяли путем замеров слепков, снятых с зубьев каждой исследованной шестерни с использованием метакриловой смолы Degaroute 465, которая применялась также для определения глубины выкрашивания поврежденных зубьев. По результатам замеров слепков установлено, что глубина выкрашивания по боковой поверхности в зоне однопарного зацепления зубьев испытанных шестерен составила 0,4–0,7 мм.

Результаты исследования показали, что величина коэффициента $K_{H\beta}$, учитывающего неравномерность распределения нагрузки по ширине венца, колебалась от 1,04 до 1,50 для всех испытанных зубчатых пар. Полученные результаты позволили уточнить величину контактных напряжений σ_H , действующих на контактирующих поверхностях каждой пары испытанных шестерен.

Расчет эквивалентных касательных напряжений по формуле (6) с учетом уточненных значений контактных напряжений, действующих при режимах стендовых испытаний, показал, что глубина залегания максимальных величин эквивалентных напряжений составляет 0,5–0,6 мм, что хорошо согласуется с экспериментальными данными (см. рис. 1, а). Следовательно, можно сделать вывод, что зона зарождения глубинного контактного выкрашивания для шестерен с модулем 6,5 мм находится на глубине залегания максимальных эквивалентных касательных напряжений. Полученный результат показывает обоснованность применения расчетной модели напряженного состояния для эвольвентных зубчатых колес.

Заключение. При контактном нагружении поверхностно упрочненного материала напряженное состояние подповерхностного слоя неоднородное и изменяется с расстоянием от поверхности. Неоднородность напряженного состояния подповерхностного слоя является предпосылкой появления в нем критических зон, в которых могут зарождаться и развиваться усталостные процессы контактного разрушения.

Результаты натурных стендовых испытаний зубчатых передач, изготовленных из цементуемой стали 20ХГНР показали, что зона зарождения глубинного контактного выкрашивания для шестерен с модулем 6,5 мм находится на глубине залегания максимальных эквивалентных касательных напряжений. Полученный результат показывает обоснованность применения расчетной модели напряженного состояния для эвольвентных зубчатых колес.

Список использованных источников

1. Андожский, В. Д. Расчет зубчатых передач / В. Д. Андожский. – М.: Машгиз, 1955. – 243 с.
2. Buckingham, E. How contact stresses affect gear teeth / E. Buckingham // *SAE Journal*. – 1950. – Vol. 58, № 10. – P. 168–172.
3. Nishihara, T. Pitting of Steel under Lubricated Rolling Contact and Allowable Pressure on Tooth Profiles / T. Nishihara, T. Kobayashi // *Trans. Soc. Mech. Eng. Jpn.* – 1937. – Vol. 3, № 13. – P. 292–298. https://doi.org/10.1299/kikai1935.3.13_292
4. Трубин, Г. К. Контактная усталость материалов для зубчатых колес / Г. К. Трубин. – М.: Машгиз, 1962. – 404 с.
5. Эрлих, Л. Б. Механизм усталостных разрушений при контактной нагрузке / Л. Б. Эрлих // *Циклическая прочность металлов: сборник*. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – С. 74–81.
6. Гальпер, Р. Р. Контактная прочность высокоскоростных зубчатых передач с поверхностным упрочнением / Р. Р. Гальпер. – М.: ЛДНТП, 1964. – 54 с.
7. Петрусевиц, А. И. Контактная прочность деталей машин / А. И. Петрусевиц. – М.: Машиностроение, 1970. – 64 с.
8. Сосновский, Л. А. Основы трибофатики: в 2 т. / Л. А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2003. – Т. 1, 2.
9. Тескер, Е. И. Современные методы расчета и повышения несущей способности поверхностно упрочненных зубчатых передач трансмиссий и приводов / Е. И. Тескер. – М.: Машиностроение, 2011. – 434 с.
10. Руденко, С. П. Исследование сопротивления контактной усталости поверхностно упрочненных зубчатых колес / С. П. Руденко // *Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. – 2009. – № 4. – С. 48–53.
11. Руденко, С. П. Контактная усталость зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин / С. П. Руденко, А. Л. Валько. – Минск: Беларус. навука, 2014. – 126 с.
12. Rudenko, S. P. Contact Fatigue Resistance of Carburized Gears from Chromium-Nickel Steels / S. P. Rudenko, A. L. Val'ko // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2017. – Vol. 59, № 1–2. – P. 60–64. <https://doi.org/10.1007/s11041-017-0103-3>
13. О методах оценки несущей способности цилиндрических зубчатых передач / В. Н. Кудрявцев [и др.] // *Вестн. машиностроения*. – 1989. – № 9. – С. 29–36.
14. Брагин, В. В. Проектирование высоконапряженных цилиндрических зубчатых передач / В. В. Брагин, Д. Н. Решетов. – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.
15. Расчет на прочность в машиностроении / С. Д. Пономарев [и др.]. – М.: Машгиз, 1958. – Т. 2: Некоторые задачи прикладной теории упругости, расчеты за пределами упругости, расчеты на ползучесть. – 974 с.
16. Редукторы энергетических машин: справочник / под ред. Ю. Л. Державца. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1985. – 232 с.
17. Саверин, М. М. Контактная прочность материала в условиях одновременного действия нормальной и касательной нагрузки / М. М. Саверин. – М.: Машгиз, 1946. – 149 с.
18. Fujita, K. Effect of Case Depth and Relative Radius of Curvature on Surface Durability of Case-Hardened Chromium Molybdenum Steel Roller / K. Fujita, A. Yoshida // *J. Eng. Ind.* – 1981. – Vol. 103, № 2. – P. 115–124. <https://doi.org/10.1115/1.3254942>
19. Авиационные зубчатые передачи и редукторы: справочник / под ред. Э. Б. Вулгакова. – М.: Машиностроение, 1981. – 374 с.

References

1. Andozhskii V. D. *Calculation of Gears*. Moscow, Mashgiz Publ., 1955. 243 p. (in Russian).
2. Buckingham E. How contact stresses affect gear teeth. *SAE Journal*, 1950, vol. 58, no. 10, pp. 168–172.
3. Nishihara T. Pitting of Steel under Lubricated Rolling Contact and Allowable Pressure on Tooth Profiles. *Transaction of the Society of Mechanical Engineering Japan*, 1937, vol. 3, no. 13, pp. 292–298. https://doi.org/10.1299/kikai1935.3.13_292
4. Trubin G. K. *Contact Fatigue of Gear Materials*. Moscow, Mashgiz Publ., 1962. 404 p. (in Russian).
5. Erlich L. B. Mechanism of fatigue failure under contact loading. *Cyclic Strength of Metals: Collection*. Moscow, Publishing House of Academy of Sciences of USSR, 1962, pp. 74–81 (in Russian).
6. Galper P. P. *Contact Strength of High-Speed Gears with Surface Hardening*. Moscow, LDNTP Publ., 1964. 54 p. (in Russian).
7. Petrushevich A. I. *Contact Strength of Machine Parts*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 64 p. (in Russian).
8. Sosnovsky L. A. *Podstawy Tribophatics. Volumes 1, 2*. Homel, Belarusian State University of Transport, 2003 (in Russian).
9. Tesker E. I. *Modern Methods for Calculating and Improving the Load-Carrying Capacity of Surface-Hardened Gear Transmissions and Drives*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2011. 434 p. (in Russian).
10. Rudenko S. P. Research of resistance of contact fatigue of surface-hardened gear-wheels. *Vestsi Natsyyanal'nei akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2009, no. 4, pp. 48–53 (in Russian).

11. Rudenko S. P., Val'ko A. L. *Contact Fatigue of Gearwheels in Transmissions of Power-Saturated Machines*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014. 126 p. (in Russian).
12. Rudenko S. P., Valko A. L. Contact Fatigue Resistance of Carburized Gears from Chromium-Nickel Steels. *Metal Science and Heat Treatment*, 2017, vol. 59, no. 1–2, pp. 60–64. <https://doi.org/10.1007/s11041-017-0103-3>
13. Kudryavtsev V. N., Reshetov D. N., Kuz'min I. S., Filippenkov A. L. On methods for estimating the load-carrying capacity of spur gears. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 1989, no. 9, pp. 29–36 (in Russian).
14. Bragin V. V., Reshetov D. N. *Design of High-Stress Spur Gears*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 224 p. (in Russian).
15. Ponomarev S. D., Biderman V. L., Likharev K. K., Makushin V. M., Malinin N. N., Fedos'ev V. I. *Strength Calculation in Mechanical Engineering. Volume 2. Some Problems of Applied Elasticity Theory, Calculations Beyond Elasticity, Creep Calculations*. Moscow, Mashgiz Publ., 1958. 974 p. (in Russian).
16. Balashov B. A., Galper R. R., Garkavi L. M. [at al.]. *Power Machine Gearboxes*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., Leningrad branch, 1985. 232 p. (in Russian).
17. Saverin M. M. *Contact Strength of the Material under Simultaneous Normal and Tangential Loading*. Moscow, Mashgiz Publ., 1946. 149 p. (in Russian).
18. Fujita K., Yoshida A. Effect of Case Depth and Relative Radius of Curvature on Surface Durability of Case-Hardened Chromium Molybdenum Steel Roller. *Journal of Engineering for Industry*, 1981, vol. 103, no. 2, pp. 115–124. <https://doi.org/10.1115/1.3254942>
19. Alekseev V. I., Anan'ev V. M., Bulygina M. M. *Aircraft Gears and Gearboxes*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 374 p. (in Russian).

Информация об авторах

Руденко Сергей Петрович – кандидат технических наук, Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sprud.47@mail.ru

Сандомирский Сергей Григорьевич – доктор технических наук, доцент, Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sand_work@mail.ru

Information about the authors

Sergey P. Rudenko – Ph. D. (Engineering), Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sprud.47@mail.ru

Sergey G. Sandomirski – D. Sc. (Engineering), Assistant Professor, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sand_work@mail.ru

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

UDC 536.2
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-285-297>

Received 29.03.2022
Поступила в редакцию 29.03.2022

Vladislav S. Volcheck, Maryia S. Baranova, Viktor R. Stempitsky

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

THERMAL CONDUCTIVITY OF WURTZITE GALLIUM NITRIDE

Abstract. This paper reviews the theoretical and experimental works concerning one of the most important parameters of wurtzite gallium nitride – thermal conductivity. Since the heat in gallium nitride is transported almost exclusively by phonons, its thermal conductivity has a temperature behavior typical of most nonmetallic crystals: the thermal conductivity increases proportionally to the third power of temperature at lower temperatures, reaches its maximum at approximately 1/20 of the Debye temperature and decreases proportionally to temperature at higher temperatures. It is shown that the thermal conductivity of gallium nitride (depending on fabrication process, crystallographic direction, concentration of impurity and other defects, isotopic purity) varies significantly, emphasizing the importance of determining this parameter for the samples that closely resemble those being used in specific applications. For isotopically pure undoped wurtzite gallium nitride, the thermal conductivity at room temperature has been estimated as high as 5.4 W/(cm·K). The maximum room temperature value measured for bulk-shaped samples of single crystal gallium nitride has been 2.79 W/(cm·K).

Keywords: gallium nitride, phonon, thermal conductivity, GaN, temperature dependence

For citation: Volcheck V. S., Baranova M. S., Stempitsky V. R. Thermal conductivity of wurtzite gallium nitride. *Vesti Natsyynal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 3, pp. 285–297. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-285-297>

В. С. Волчэк, М. С. Баранова, В. Р. Стемпицкий

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ НИТРИДА ГАЛЛИЯ С КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ ТИПА ВЮРЦИТА

Аннотация. Выполнен анализ теоретических и экспериментальных исследований одного из важнейших параметров нитрида галлия с кристаллической структурой типа вюрцита – теплопроводности. Так как перенос тепла в нитриде галлия осуществляется главным образом с помощью фононов, его теплопроводность имеет температурную зависимость, характерную для большинства неметаллических кристаллов: увеличивается пропорционально третьей степени температуры в области низких температур, достигает своего максимального значения при температуре, приблизительно равной 1/20 от дебаевской, и уменьшается пропорционально температуре в области высоких температур. Показано, что в зависимости от условий (технология изготовления образца, кристаллографическое направление, концентрация примеси и других дефектов, изотопный состав) теплопроводность нитрида галлия может находиться в большом диапазоне значений, что указывает на важность определения этого параметра именно тех образцов материала, которые используются в конкретных приложениях. Теплопроводность нелегированного изотопно-чистого нитрида галлия при комнатной температуре оценивается на уровне 5,4 Вт/(см·К). Максимальная теплопроводность, достигнутая для объемного образца из монокристаллического нитрида галлия, равна 2,79 Вт/(см·К).

Ключевые слова: нитрид галлия, теплопроводность, фонон, GaN, температурная зависимость

Для цитирования: Волчэк, В. С. Теплопроводность нитрида галлия с кристаллической структурой типа вюрцита / В. С. Волчэк, М. С. Баранова, В. Р. Стемпицкий // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, №3. – С. 285–297. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-285-297>

Introduction. Over the last decades, a lot of attention has been focused on gallium nitride (GaN) as a promising material for the application in high-power radio-frequency electronic and optoelectronic devices [1, 2]. The intense interest in this semiconductor arises from the following factors. First, the wide band gap of GaN yields a high breakdown voltage, which is valuable for high-power device operation. Second, the saturation velocity of electrons in GaN is over a factor of two larger than that in silicon, which enables high-frequency operation. Furthermore, the natural structure of GaN is wurtzite – a hexagonal crystal structure where electrical polarization effects play a major role [3]. At heterojunctions formed by group III nitrides the polarization induces a very high electron concentration, providing a large current density.

Although the structural, electronic and optical properties have been extensively studied, relatively little work, both analytical and experimental, has to date been reported on the thermal conductivity κ of GaN. Meanwhile, this thermoelectric parameter – a measure of the ability to conduct heat – is significant from both fundamental and applied aspects. One of the critical issues in the development of the nitride high-power technology is self-heating. A non-uniform distribution of the dissipated power and a rise of the average temperature that lead to the formation of a hot spot near the active area and result in the degradation of the drain current and output power are characteristic of GaN high electron mobility transistor – a device considered for broadband/multiband communication applications, radar systems and electronics in harsh environments [4, 5]. For this reason, the monitoring of the average and maximum temperatures inside the device structure is crucial to its efficiency and reliability. Being an important part of technology computer-aided design, thermal simulation makes it possible for device engineers to identify the principal cause of thermal problems as well as to create, optimize and verify the thermal design. The simulation of self-heating implies the addition of a lattice heat flow equation to the set of the fundamental semiconductor device equations – the Poisson equation and the continuity equations. Standard device simulators implement a thermodynamically rigorous model of lattice heating that accounts for Joule heating, heating and cooling due to carrier generation and recombination, the Peltier and Thomson effects [6]. One of the input parameters of the lattice heat flow equation is thermal conductivity, which can depend on temperature T and other factors. This is critical to take into account in thermal simulation as the result can be highly sensitive to the thermal conductivity values for certain regions of the device structure. Otherwise, a significant error may occur. Due to the recent advancements in the ammonothermal and hydride vapor phase epitaxy (HVPE) methods, free-standing GaN substrates have begun to gain in popularity lately. The use of native electrically insulating substrates enables to improve the crystalline quality of epitaxial layers by preventing the necessity of growing a nucleation layer, which would act as a thermal barrier for the heat flow generated in the active area of the device structure [7, 8]. As opposed to other common substrate materials, particularly sapphire, GaN may provide a sufficient heat dissipation efficiency without recourse to additional heat-removing elements [9]. From this aspect, the thermal conductivity of GaN is of interest as a key design parameter.

In this paper, we present a review of the works, both theoretical and experimental, concerning the thermal conductivity of wurtzite GaN, mainly its dependence on temperature. The problem of determining the value of this parameter has a long history and has been tackled by many authors. The correlation and interpretation of the published data is quite challenging as the densities of impurity atoms, vacancies, dislocations and isotopes in various samples are often very different or even unknown. The theoretical limit at a temperature of 300 K for isotopically pure undoped wurtzite GaN is estimated as high as 5.4 W/(cm·K) [10]. However, values lower than 3.0 W/(cm·K) are prevalent for bulk samples grown on foreign substrates owing to the presence of imperfections in the crystal [11].

Thermal Conduction in Nonmetallic Crystals. The internal energy may be transferred within a solid by several independent agents. In metals, the heat is carried both by electrons and by lattice waves, or phonons, although the electronic contribution is predominant. On the other part, in insulators, the heat is carried almost entirely by phonons. From a thermal conduction point of view, semiconductors are very similar to insulators, with the compounds listed above being no exceptions. Thus, the transport of heat in nonmetallic crystals can be interpreted using the concept of a phonon [12].

The atoms of a crystal are not quite stationary and take part in thermal vibrations around their equilibrium positions. Instead of describing the individual vibrations of the particles, which is unrealistic

and impractical, their collective motion in the crystal is considered. This approach is based on the fact, that powerful interatomic forces immediately transmit the vibrations of one particle to other particles and a collective motion in the form of an elastic wave involving all the particles of the crystal is excited in it. Such elastic waves are termed normal modes. The quantity of the normal modes equals to the number of degrees of freedom, which is $3N$, where N is the number of particles constituting the crystal. The frequency ω and the wavelength λ of a normal mode are linked by

$$\omega = \frac{2\pi\nu}{\lambda}, \quad (1)$$

where ν is the velocity of wave propagation (of sound).

Wave processes are usually described by a wave-vector \vec{q} , whose direction coincides with that of wave propagation and whose absolute value is

$$q = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (2)$$

The relationship between ω and q is termed the dispersion relationship, which is given by

$$\omega = \nu q. \quad (3)$$

The lattice waves in a crystal occupy some spectrum of frequencies. The temperature at which the entire spectrum, including the mode with the maximum frequency, is excited is called the Debye temperature θ_D . A rise in temperature above θ_D shall not be accompanied by the appearance of new normal modes. In this case, the role of the temperature is to increase the intensity, or the energy, of each of the normal modes. According to the oscillation theory, the energy of a normal mode equals to the energy of an oscillator with a mass equivalent to the mass of the vibrating atoms and the frequency of the normal mode. Hence, the total energy of the crystal formed by N atoms taking part in coupled vibrations equals to the energy of $3N$ independent normal harmonic linear oscillators. The energy of a quantum oscillator is written as

$$E = \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega, \quad (4)$$

where n is a quantum number and \hbar is the reduced Planck constant.

The minimum portion of energy that can be emitted or absorbed by a lattice in the process of thermal vibrations corresponds to the transition of the normal mode being excited from the given energy level to the adjacent level and equals to $\hbar\omega$. This portion, or quantum, of energy is termed a phonon.

The vibrations of the atoms in a crystal can only be treated as the normal modes of the lattice under certain idealized conditions: the interatomic forces are harmonic (obey Hooke's law) and the lattice is structurally perfect, isotopically pure and has no external boundaries. The departure from these idealized conditions leads to an anharmonic nature of the atomic vibrations. There are two phenomena caused by the anharmonicity – thermal expansion and thermal resistance. The effect that the thermal expansion of a lattice has on its vibrational properties is described by the Grüneisen constant γ . This dimensionless parameter relates the thermal expansion coefficient to the heat capacity defined by harmonic contribution:

$$\gamma = \frac{B\alpha_V}{C_V}, \quad (5)$$

where B is the bulk modulus, α_V is the volumetric thermal expansion coefficient and C_V is the volumetric heat capacity.

Should the vibrations of the atoms be strictly harmonic propagating through a lattice in the form of noninteracting elastic waves, there could be no thermal resistance in the crystal. In the absence of interaction the waves would be able to spread without scattering – that is, without encountering any resistance – and the thermal conductivity of the crystal would be infinitely high. The anharmonicity deprives the normal modes of the lattice of their independence and forces them to interact, exchanging energy and changing the direction of their propagation through mutual scattering. It is just these processes of interaction between the elastic waves that enable the transfer of energy from the modes of one frequency to the modes of another and the establishment of thermal equilibrium in the crystal.

It is well known that the thermal conductivity of silver at room temperature is $4.3 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ – highest of any metal. For copper, $\kappa = 4.0 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$. There are several nonmetallic crystals that exhibit a high thermal conductivity comparable to or even exceeding that of silver and copper. Many of these crystals are adamantine, or diamond-like, compounds, such as diamond, boron nitride, silicon carbide, beryllium oxide, boron phosphide, aluminum nitride, beryllium sulphide, boron arsenide, silicon, aluminum phosphide and gallium phosphide. GaN is also included in this category of materials. In all of these crystals the atoms possess tetrahedral coordination and κ in this series decreases from $20 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ for diamond to $1 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ for gallium phosphide [13].

The dependence of the thermal conductivity on temperature is universal for almost all pure electrically insulating crystals: κ grows as T^3 at lower temperatures, reaches a maximum at approximately $0.05\theta_D$ and falls off as T^{-1} or faster at higher temperatures [14]. At temperatures below θ_D , the phonon concentration reduces dramatically with a fall in temperature. This leads to a sharp increase in the phonon mean free path – the average distance between scattering events, or collisions – so that at $0.05\theta_D$ it becomes comparable to the dimensions of the crystal. As the crystal surface is usually a poor reflector of phonons, any further reduction in temperature does not result in an increase in the mean free path, for the latter is determined by the dimensions of the crystal only. The temperature dependence of the thermal conductivity within this range of temperatures parallels that of the heat capacity, which is proportional to T^3 .

As the temperature rises, there are two opposing processes occurring at the same time – an increase in the phonon concentration, which should make the thermal conductivity to grow, and an increase in the resistive phonon-phonon scattering – three-phonon umklapp scattering or U-process – and a subsequent decrease in the phonon mean free path, which should cause the thermal conductivity to drop. For a low phonon concentration, the first factor is predominant and κ increases with temperature. However, starting with a certain concentration of phonons the second factor becomes prevailing and κ after passing through its maximum decreases with temperature as T^{-1} or faster.

Phonons can also be scattered by point defects, such as impurity atoms, vacancies and isotopes. The reasons for this are the differences in mass, size and interatomic force constants between the defects and the host atoms. Having no effect at low temperatures, point defects, however, take on significance at intermediate temperatures, where they will depress the peak of the thermal conductivity below that of the pure crystal. The magnitude of an isotope effect can be determined by

$$P = \frac{\kappa_{\text{pure}}}{\kappa_{\text{natural}}}, \quad (6)$$

where κ_{pure} corresponds to κ of the isotopically pure material and κ_{natural} to κ with naturally occurring isotope proportions.

While the influence of most scattering processes on overall thermal conductivity at different temperatures has been well analyzed, the normal three-phonon scattering processes, or N-processes, have been neglected in many publications. This scattering mechanism conserves phonon momentum and energy and hence does not contribute directly to thermal resistance. However, the normal processes lead to a redistribution of momentum and energy among phonons more likely to participate in umklapp processes thereby indirectly affecting the overall thermal conductivity.

In many nonmetallic crystals, the electronic component of the thermal conduction is small enough and can be neglected. Florescu *et al.* [15] estimated the electronic contribution to the thermal conductivity of GaN to be about $1.5 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$, which is three orders of magnitude smaller than the typical values of κ for GaN.

Theoretical Studies of the Thermal Conduction in GaN. One of the earliest theoretical studies of the thermal conduction in GaN was carried out by Slack [13], who applied the fundamental theory given by Leibfried and Schlömann to predict the intrinsic thermal conductivity – the upper limit for κ defined only by crystal anharmonicity. According to this theory, the thermal conductivity of adamantine crystals in a temperature range of $T > \theta_D$ is proportional to the factor $\delta m \theta_D^3$:

$$\kappa = A \frac{\delta m \theta_D^3}{\gamma^2 T}, \quad (7)$$

where A is a scaling constant, δ^3 is the average volume occupied by one atom of the crystal and m is the average mass of the atoms in one mole of the compound.

It must be noted that Eq. (7) is strictly valid only for face-centered-cubic crystals having one atom per primitive crystallographic unit cell. From the dependencies of κ on $\delta m \theta_D^3$ plotted for the series of materials, for which the data was by then available, the scaling constant was estimated at $2.5 \text{ s}^{-3} \cdot \text{K}^{-3}$. For GaN, $\delta = 2.25 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$, $m = 41.86 \text{ g}$, $\theta_D = 600 \text{ K}$ and $\delta m \theta_D^3 = 203.44 \text{ cm} \cdot \text{g} \cdot \text{K}^3$. The Grüneisen parameter was omitted as it was yet not known. Thus, the intrinsic thermal conductivity at 300 K was predicted at $1.7 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$.

A similar approach but without using a scaling constant was taken by Witek [16], who formulated the thermal conductivity of ideal single nonmetallic crystals in terms of the bulk modulus, the Debye temperature and the Grüneisen parameter:

$$\kappa = \frac{1}{3} \frac{\delta \nu B}{\gamma^2 T}. \quad (8)$$

This equation was derived from the suggestion by Dugdale and MacDonald [17] that the thermal conductivity should be related to the thermal expansion coefficient. They noticed that the dimensionless term $\gamma \alpha_V T$ serves as a measure of the departure of a lattice from harmonicity and proposed that the phonon mean free path could be calculated by

$$l = \frac{\delta}{\gamma \alpha_V T}. \quad (9)$$

The substitution of B in Eq. (8) by $\frac{\gamma C_V}{\alpha_V}$ and the insertion of Eq. (9) give another expression for thermal conductivity:

$$\kappa = \frac{1}{3} l \nu C_V. \quad (10)$$

By solving Eq. (8), the Grüneisen parameter and the intrinsic thermal conductivity of GaN at 300 K were estimated at 0.74 and $4.1 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$, respectively. The latter exceeded considerably any values that had previously been obtained by experiment. In real lattices, the anharmonicity is not the only source of the resistive phonon scattering. Macroscopic and point defects scatter phonons independently on the anharmonicity, decreasing thermal conductivity.

The evaluation of the thermal conductivity of a GaN sample characterized by realistic material parameters specific for a given growth technique can be made in the framework of Callaway's phenomenological model [18]. It has proved to be a feasible computational tool and has been widely used for technologically important semiconductors. A long list of the publications in which this model was employed is presented in [19].

In Callaway's formulation, the thermal conductivity contains two terms $\kappa = \kappa_1 + \kappa_2$, where

$$\kappa_1 = \frac{\kappa_B^4 T^3}{2\pi^2 \hbar^3 \nu} \int_0^{\theta_D/T} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} \tau dx, \quad (11)$$

$$\kappa_2 = \frac{\kappa_B^4 T^3}{2\pi^2 \hbar^3 \nu} \frac{\left\{ \int_0^{\theta_D/T} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} \frac{\tau}{\tau_N} dx \right\}^2}{\int_0^{\theta_D/T} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} \frac{\tau}{\tau_N \tau_R} dx}, \quad (12)$$

where κ_B is the Boltzmann constant, τ is the combined relaxation time, τ_N and τ_R are the relaxation times in normal and resistive processes, respectively, and

$$x = \frac{\hbar \omega}{\kappa_B T}. \quad (13)$$

This model is derived using Debye-like phonon density of states and under the assumption of one effective acoustic-phonon dispersion branch and the additivity of the relaxation rates for independent scattering mechanisms:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_N} + \frac{1}{\tau_R}. \quad (14)$$

The relaxation rates in normal processes become comparable to those in resistive processes only in high-purity, defect-free samples. Otherwise, the resistive processes are totally dominant and the condition $\tau_N \gg \tau_R$ leads to $\kappa \approx \kappa_1$. Thus, the final expression is often written as

$$\kappa = \frac{\kappa_B^4 T^3}{2\pi^2 \hbar^3 v} \int_0^{\theta_D/T} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} \tau dx \approx \frac{1}{3} \sum_{j,q} v_j^2(\vec{q}) \tau_j(\vec{q}) C_{V_j}(\vec{q}), \quad (15)$$

where j denotes a specific phonon polarization type.

Using Callaway's theory, the thermal conduction in GaN has been investigated by a number of researchers [10, 14, 20, 21]. Kotchetkov *et al.* [20] considered the three-phonon umklapp scattering (described by a relaxation time τ_U), the scattering on impurity atoms and the scattering on core, screw and edge dislocations. Given the wide discrepancy in the material parameters reported for GaN, the calculations were performed with two distinctly different sets of the input data. The solution of Eq. (15) with $\tau = \tau_U$ gave the values of 3.44 and 3.70 W/(cm · K) for the intrinsic thermal conductivity at 300 K. When all of the scattering processes were accounted for, the model showed the reduction of the thermal conductivity from 1.97 to 1.31 W/(cm · K) as the dislocation line density was raised from 10^{10} to 10^{12} cm⁻².

The same research team [10] also investigated separately the influence that is exerted by the doping density on the thermal conductivity. After making several modifications to the model, including the addition of a mixed dislocations component, and making corrections to some material parameters, the intrinsic thermal conductivity values were estimated at 3.36 and 5.40 W/(cm · K). When all of the scattering mechanisms were taken into account, the thermal conductivity fell off linearly with the natural logarithm of the doping density – about a factor of two decrease in κ for every decade increase in the doping density. As the latter was increased from 10^{17} to 10^{18} cm⁻³, the thermal conductivity dropped from 1.77 to 0.86 W/(cm · K).

Liu and Balandin [21] accounted for the three-phonon umklapp scattering, the scattering on impurity atoms and the scattering on external boundaries. The thermal conductivity was equal to 1.57 W/(cm · K) at room temperature.

Natural gallium (³¹Ga) consists of a mixture of two stable isotopes: 60.11 % ⁶⁹Ga and 39.89 % ⁷¹Ga. Natural nitrogen (⁷N) has also two stable isotopes: 99.63 % ¹⁴N and 0.37 % ¹⁵N. The isotope effect on the thermal conductivity of high-purity GaN was analyzed by Morelli *et al.* [14] with Callaway's model modified to include the contribution of both transverse and longitudinal phonons explicitly. For determining the combined scattering rate, the umklapp and normal processes, the phonon-isotope scattering and the scattering on boundaries were considered. The model predicted an isotope effect of 1.05 at 300 K.

This rather small value of the isotope effect was disputed by Lindsay *et al.* [22], who applied an *ab initio* (or “from first-principles”) formalism to determine the thermal conductivity of GaN defined by the three-phonon umklapp scattering and the phonon-isotope scattering. The first-principles method combines an exact iterative solution of the phonon Boltzmann transport equation in the single-mode relaxation time approximation with accurate computations of the second-order (harmonic) and third-order (anharmonic) interatomic force constants using the density functional theory and the density functional perturbation theory. The second-order interatomic force constants are required for the calculation of the phonon dispersion relation, while the third-order constants are necessary for the calculation of the three-phonon scattering rates. The advantage of this method is that no adjustable parameters are invoked as the interatomic force constants are the only input parameters required for the exact solution [23]. The thermal conductivity obtained by solving the phonon Boltzmann transport equation can be expressed as

$$\kappa = \frac{1}{\kappa_B T^2 N V} \sum_{\zeta} (\hbar \omega)^2 \bar{n}_{\zeta} (\bar{n}_{\zeta} + 1) v_{\alpha\zeta} d_{\beta\zeta}, \quad (16)$$

where N is the number of discretizing \vec{q} points in the Brillouin zone, V is the volume of the primitive unit cell, \bar{n}_{ζ} is the phonon group equilibrium population, v_{ζ} is the phonon group velocity, d_{ζ} is the mean free displacement, α and β are the Cartesian directions, ζ represents the phonon mode (\vec{q}, j) .

Unlike previous estimates [14, 24], Lindsay *et al.* showed that the isotope effect in wurtzite GaN is very large – about 1.65 at room temperature. The upper limit for κ was found to be around 4 W/(cm·K) at 300 K. These features were ascribed to the substantial isotope mixture in gallium, to the large frequency gap between the acoustic and optical phonon branches and to the high frequency scale of the phonon dispersion in GaN. The latter two points slacken the phonon-phonon scattering and, in particular, the scattering between the acoustic and optical phonons. Since the phonon-isotope scattering is not affected by temperature, starting from 500 K with decreasing temperature, the phonon-phonon scattering becomes weaker, causing the thermal conductivity to rise and making the scattering on isotopes more pronounced. At room temperature, the in-plane κ_{in} (along the [100] direction) and the out-of-plane κ_{out} (along the c -axis, or the [001] direction) values of the intrinsic thermal conductivity (κ_{pure}) were 4.01 and 3.85 W/(cm·K), respectively. The corresponding values for GaN with the naturally occurring gallium isotope concentrations ($\kappa_{natural}$) were 2.42 and 2.39 W/(cm·K).

The natural structure of GaN is wurtzite – a crystal structure belonging to the hexagonal crystal system, which is the most anisotropic among the other six crystal systems. Several investigations showed that the thermal conductivity of wurtzite GaN is isotropic around room temperature [24, 25]. On the other part, in most analytical works, the average value of the three directions or the value of one arbitrary direction are often taken as the thermal conductivity, omitting the anisotropy of the material. By performing non-equilibrium molecular dynamics simulation, Ju *et al.* [26] recently demonstrated that κ of defect-free wurtzite GaN along the [001] direction, is by a factor of 1.25 higher than that along [100] at room temperature. The evident anisotropic behavior of the thermal conductivity of wurtzite GaN at low temperatures was confirmed by Wu *et al.* [27], Qin *et al.* [28] and Jiang *et al.* [29]. In their research, Wu *et al.* developed a full-dispersion Monte Carlo simulation method coupled with the first-principles technique. According to their combined approach, the phonon dispersion relation and the scattering rates were computed using the first-principles method and served as the input data for the Monte Carlo solution of the phonon Boltzmann transport equation by applying the open-source ShengBTE code [30]. The thermal conductivity at room temperature of isotopically pure GaN along the [001] and [100] directions was calculated to be 4.04 and 3.62 W/(cm·K), respectively, leading to an anisotropy factor of 1.12. As the temperature decreased from 500 to 100 K, the factor increased from 1.10 to 1.25, indicating that the anisotropy of wurtzite GaN cannot be neglected, especially at low temperatures.

Qin *et al.* and Jiang *et al.* employed the first-principles method with a plane-wave pseudopotential formulation in the framework of the density functional theory as implemented in the Vienna Ab initio Simulation Package. The generalized gradient approximation with the Perdew–Burke–Ernzerhof parameterization was adopted for the exchange-correlation functional. The numerical solutions of the linearized phonon Boltzmann transport equation were also carried out using the ShengBTE software package. As was found by Qin *et al.*, the thermal conductivity at room temperature along the [001] and [100] directions of bulk GaN was evaluated to be 3.25 and 2.80 W/(cm·K), respectively, yielding an anisotropy factor of 1.16. In excellent agreement with the results obtained by Wu *et al.*, Jiang *et al.*, it determined the κ_{out} and κ_{in} values to be 4.09 and 3.63 W/(cm·K) at 300 K, respectively, giving an anisotropy factor of 1.13. When the temperature fell off from 800 to 100 K, the factor grew from 1.09 to 1.42.

By employing the first-principles approach to analyze the thermal conductivity of isotopically pure GaN, Garg *et al.* [31] recently observed a remarkable feature of the thermal conduction, namely, a spectral focusing of κ . It turns out that almost 60 % of the heat is transferred by phonons in a very narrow frequency range of 5–7 THz, which spans 9 % of the frequency range in GaN. The κ_{out} and κ_{in} values for the isotopically pure material were determined to be 3.73 and 3.90 W/(cm·K), respectively. The corresponding values for $\kappa_{natural}$ were equal to 2.34 and 2.38 W/(cm·K) – a very good agreement with the results of Lindsay *et al.*

Over the last few years, the application of machine learning techniques to solid-state physics have rapidly gained in popularity. The assessment of the thermal conductivity of bulk GaN using the innovative high-dimensional neural-network method developed by Behler and Parrinello [32] was first demonstrated by Minamitani *et al.* [33]. The thermal conductivity at room temperature along the [001] and [100] directions was computed to be 3.10 and 2.76 W/(cm·K), respectively. To estimate the accuracy of the method, these values were compared to the density functional theory calculation results, which were $\kappa_{\text{out}} = 3.26$ W/(cm·K) and $\kappa_{\text{in}} = 2.74$ W/(cm·K).

The dependence of the thermal conductivity on temperature for wurtzite GaN with naturally occurred isotope proportions obtained mainly by calculations is shown in Figure 1. For the sake of comparison, the experimental results of Jezowski *et al.* [25] and Simon *et al.* [34] are also included. The dislocation line density in “Kotchetkov *et al.* (2001)” is 10^{10} cm⁻². The dislocations in “Zou *et al.* (2002)” are evenly distributed among the screw, edge and mixed components. For “Jezowski *et al.* (2003)”, the best of the highly conductive samples is taken. The “Simon *et al.* (2014)” data points are given for the semi-insulating oxygen-magnesium co-doped sample. The “Minamitani *et al.* (2019) [001]” and “Minamitani *et al.* (2019) [100]” curves correspond to the κ values derived by the neural-network technique.

The dependence of the thermal conductivity on temperature for isotopically pure wurtzite GaN is shown in Figure 2.

Experimental Studies of the Thermal Conduction in GaN. The earliest experimental study of the thermal conduction in GaN was carried out by Sichel and Pankove [35] for a temperature range from 25 to 360 K. The bulk sample was fabricated by HVPE on a sapphire substrate [36]. The process included a two-hour reaction of gallium monochloride with ammonia at 1223 K. After the substrate was removed, the two surfaces of the GaN layer with a thickness of 400 μm were polished flat and parallel. The thermal conductivity evaluated along the *c*-axis had a slope of -0.76 around room temperature and a value of 1.3 W/(cm·K). Both of these values were small in comparison to the contemporary estimates [13], which was attributed by the authors to the high impurity density.

Using a scanning thermal microscope, Asnin *et al.* [37] performed high spatial resolution measurements of the thermal conductivity at 300 K on different patterned sections of GaN prepared by the lateral epitaxial overgrowth (LEO) technology on a sapphire substrate. The samples were fabricated by metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD) at 1273 K with trimethylgallium and ammonia as the source precursors. On several sections of GaN, values of 1.7–1.8 W/(cm·K) were registered. Since the quality of the material obtained by MOCVD is generally better than that of the corresponding HVPE

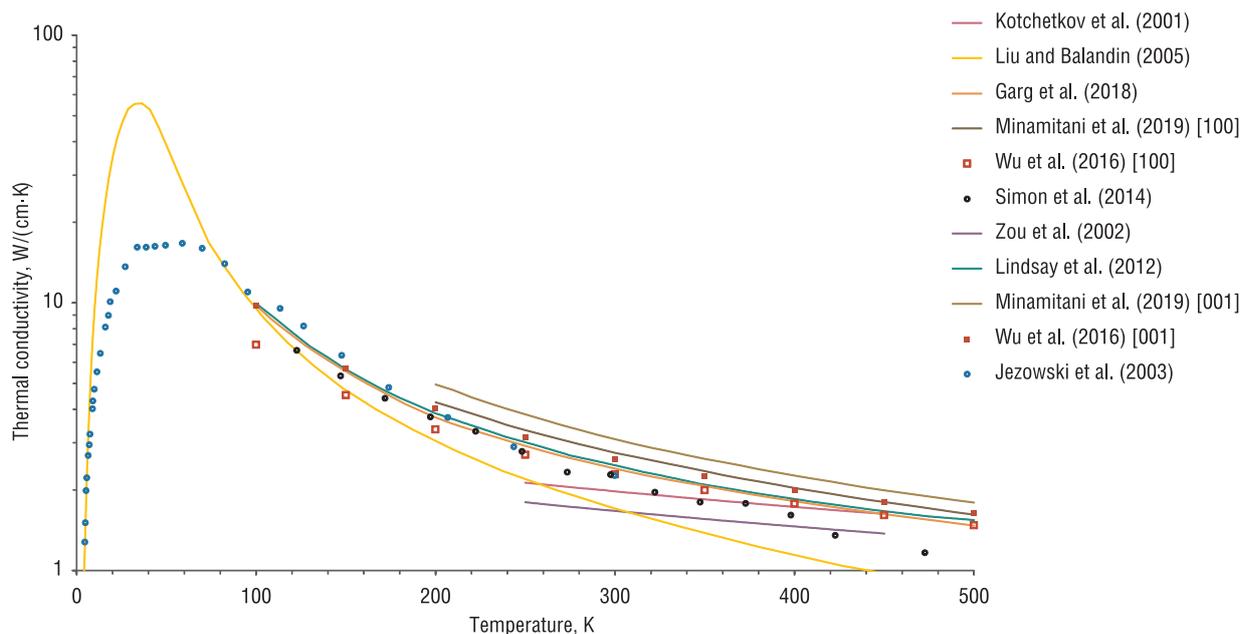


Figure 1. Thermal conductivity of wurtzite GaN with naturally occurred isotope proportions as a function of temperature obtained mainly by calculations

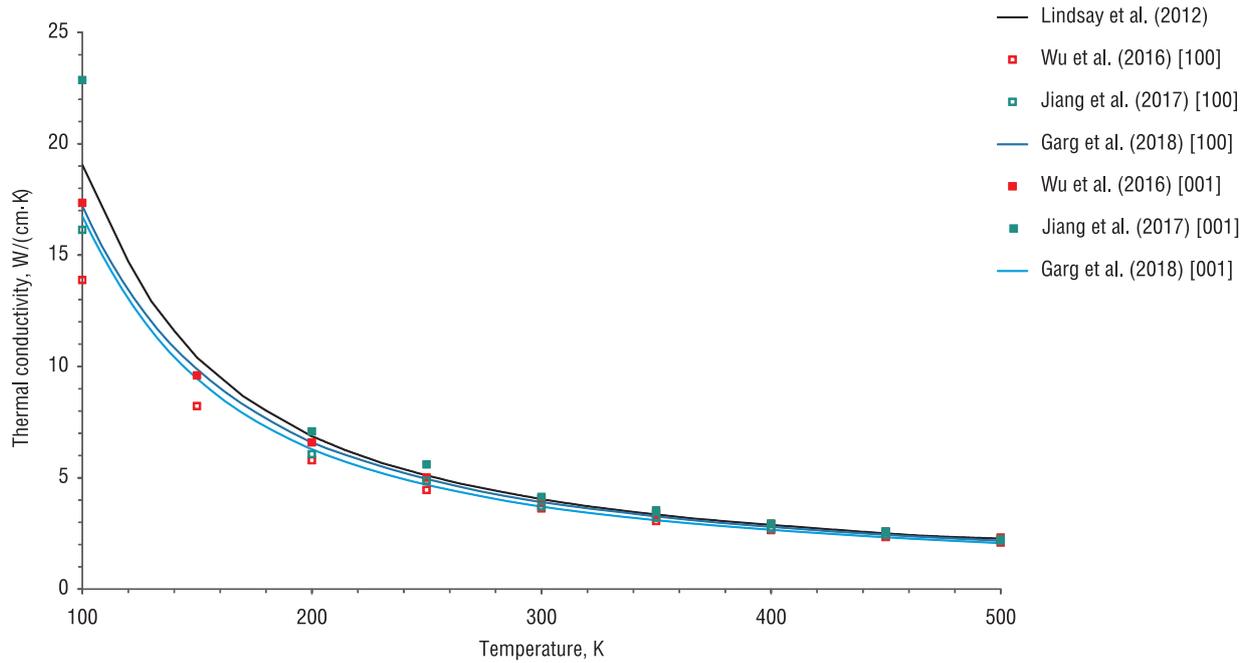


Figure 2. Thermal conductivity of isotopically pure wurtzite GaN as a function of temperature

sample, the higher values of κ were believed to be an indication of the reduced defect densities. Using the third-harmonic ($3-\omega$) electrical method, this assumption was soon corroborated by Luo *et al.* [38], who obtained a room temperature thermal conductivity in excess of 1.55 W/(cm·K) for the LEO films grown by MOCVD at 1333 K. In the paper [39], a comparison was drawn between the fully and the partly coalesced LEO sections of GaN prepared by MOCVD at 1273 K on a sapphire substrate. The measurements were taken by a scanning thermal microscope having a spatial resolution of $\sim 2-3 \mu\text{m}$. On the fully coalesced sample, the thermal conductivity lay in an interval from 1.86 to 2.05 W/(cm·K) over a distance of approximately 50 μm . One of the partly coalesced samples had κ between 2.00 and 2.10 W/(cm·K).

The thermal conductivity of GaN as a function of the doping density was experimentally researched by Florescu *et al.* [15]. The three sets of samples were fabricated by HVPE in a vertical reactor. The process consisted of two stages. First, gallium monochloride was synthesized upstream by a reaction of hydrogen chloride gas with liquid gallium at 1073–1173 K. Second, the gallium monochloride was transported to a sapphire substrate where it reacted with ammonia at 1273–1373 K forming a GaN layer. In all three sets, the thermal conductivity reduced linearly with the natural logarithm of the doping density, the variation being about a factor of two decrease in κ for every 10-fold increase in the doping density. For one of the most lightly-doped sample ($6.9 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), the thermal conductivity was found to be 1.95 W/(cm·K) at 300 K. As it was mentioned above, the dependence of this kind would later be confirmed analytically by Zou *et al.* [10] in a framework of Callaway's model.

One of the common impurities that affect the thermal conductivity of GaN is oxygen, which enters the lattice not by the replacement of nitrogen atoms but by the incorporation of gallium vacancies. The metal vacancies are very effective phonon scatterers [13]. To verify this view, Slack *et al.* [24] considered the thermal conductivity of a GaN plate manufactured by HVPE on a sapphire substrate, which was subsequently deleted. The major impurities were oxygen ($2.1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) and silicon ($3.7 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$). The thermal conductivity was equal to 2.27 W/(cm·K) at 300 K and possessed a slope of -1.22 in a temperature range from 80 to 300 K.

The first systematic study of the low-temperature behavior of GaN was reportedly carried out by Jezowski *et al.* [25] by comparing highly conductive and highly resistive (doped by magnesium) single crystals. The free-standing bulk samples were fabricated from nitrogen solution in liquid gallium at a high temperature and under a high pressure. The measurements were performed by the axial stationary heat flow method in a temperature range 4.2–300 K. The best of the highly conductive samples showed a thermal conductivity of 2.26 W/(cm·K) at 300 K, while the magnesium-doped GaN layer had $\kappa = 1.60 \text{ W/(cm·K)}$.

The high-temperature thermal properties of GaN were studied by Shibata *et al.* [40]. The single crystal sample was fabricated in a conventional vertical HVPE reactor at 1223–1293 K on a sapphire substrate. The free-standing sample unintentionally doped with silicon ($2.1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) was spontaneously separated from the substrate. The thermal conductivity along the *c*-axis was obtained for a temperature range from 300 to 850 K and was equal to $2.53 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ at room temperature. This value was highest among the previously reported ones for bulk-shaped samples [24, 25, 35]. Another work on the high-temperature behavior of GaN was presented by Slomski *et al.* [11]. The two bulk samples were grown by HVPE on sapphire and by the ammonothermal method on GaN, with the substrates subsequently removed. The density of dislocations laid in a range from 10^4 to 10^6 cm^{-2} . Using the $3\text{-}\omega$ technique, the thermal conductivity was extracted for a temperature range 300–460 K. The room temperature values of κ were equal to 2.65 and $2.79 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$, respectively, and the slopes were determined to be -1.43 and -1.38 .

Further investigation of the influence that is exerted by impurities on the thermal conductivity of GaN was made by Jagannadham *et al.* [41], who examined undoped, *n*-type (silicon-doped) and *p*-type (magnesium-doped) films on a sapphire substrate. The samples were fabricated by MOCVD at 1303 K for different periods of time with trimethylgallium and ammonia as the precursors. The deposition process was common to all three films except the dopant incorporation. The $3\text{-}\omega$ measurements were taken at 215, 250 and 300 K. The values of κ – 5.4, 4.8 and $2.8 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ – in the undoped film were much higher compared to those in the *n*- and *p*-type samples. This was due to the absence of the phonon scattering on dopants, the larger thickness of the undoped film and the correspondingly lower density of dislocations. The presence of silicon and hydrogen in the *n*-type films was responsible for the values lower than those in the *p*-type films doped only by magnesium. Simon *et al.* [34] investigated the impact of oxygen and oxygen-magnesium co-doping on the thermal conductivity of bulk crystals with a low dislocation density ($\sim 10^4 \text{ cm}^{-2}$) grown by the ammonothermal method. The $3\text{-}\omega$ measurements were performed between 120 and 520 K. The heavily oxygen-doped sample attained the lowest value of κ – $1.64 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ at 300 K – which was ascribed to the increased phonon-dopant scattering. On the contrary, the highest value – $2.30 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ at 300 K – was observed for the semi-insulating oxygen-magnesium co-doped sample.

A high thermal conductivity of $2.94 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ was determined by Richter *et al.* [42] for a cylindrical sample of 3.6 mm thickness and 6.0 mm diameter manufactured by HVPE.

The thermal conductivity of wurtzite GaN as a function of temperature obtained primarily by measurements is presented in Figure 3. For the sake of comparison, the theoretical results of Liu and Balandin and Garg *et al.* are also given. The “Slomski *et al.* (2018)” curve has the slope of -1.38 .

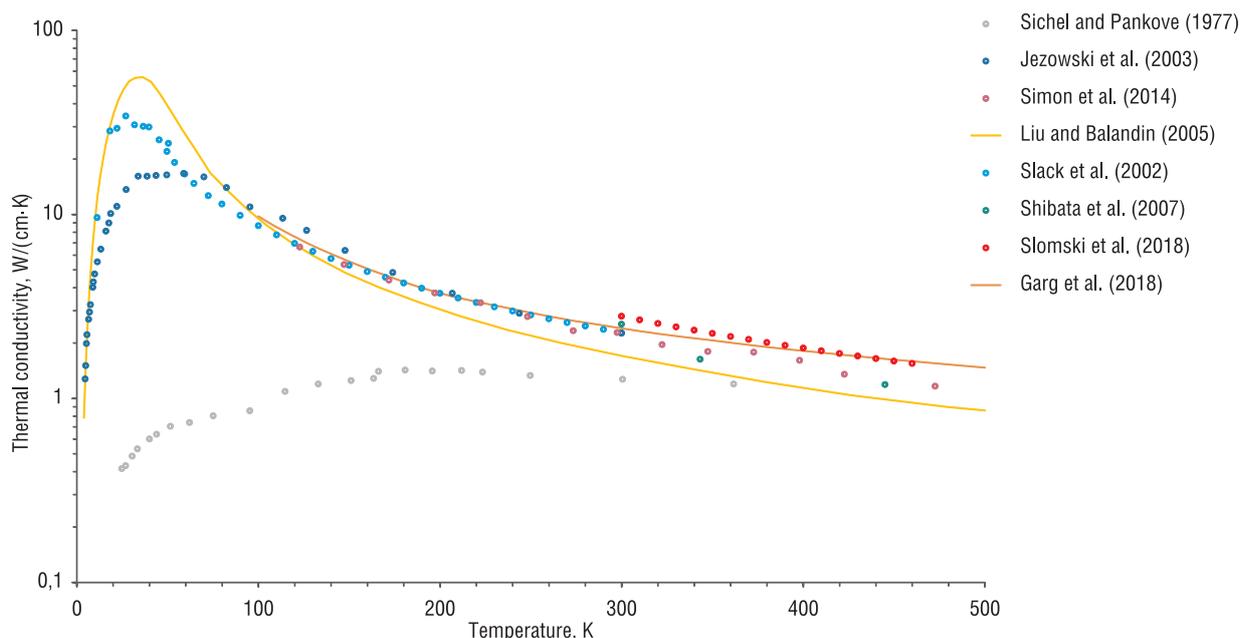


Figure 3. Thermal conductivity of wurtzite GaN as a function of temperature obtained primarily by experiment

Conclusions. In this review, a number of theoretical and experimental studies of the thermal conductivity of wurtzite GaN, particularly its dependence on temperature, has been described. A comparison of the results has also been made.

The heat in GaN is transported almost exclusively by phonons. Its thermal conductivity has a temperature behavior typical of most nonmetallic crystals: κ increases as T^3 at lower temperatures, comes up to a maximum at approximately $0.05\theta_D$ and decreases as T^{-1} at higher temperatures. At temperatures below θ_D , the thermal conductivity is limited by the scattering of the phonons on the external boundaries. As the temperature rises, the three-phonon umklapp scattering becomes predominant. The phonons in GaN can also be scattered by different point defects, such as impurity atoms, vacancies and isotopes.

For isotopically pure undoped wurtzite GaN, the value of κ at room temperature has been estimated as high as 5.4 W/(cm·K). The thermal conductivity of the films prepared by the LEO technology using MOCVD has been determined experimentally to be in a range from 1.55 to 2.10 W/(cm·K) at 300 K. The maximum room temperature value measured for the bulk-shaped samples of single crystal GaN has been 2.79 W/(cm·K).

The anisotropy of the thermal conductivity of GaN has remained to be a subject of discussion. While some investigators have shown that κ is isotropic at around room temperature, others have affirmed that this parameter exhibits a noticeable anisotropy, especially at low temperatures.

Acknowledgments

This work was supported by the grant 3.1 of Belarusian National Scientific Research Program “Photonics and Electronics for Innovations”.

Благодарности

Исследования проводились в рамках выполнения задания 3.1 Государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций».

References

1. Quay R. *Gallium Nitride Electronics*. Berlin; Heidelberg, Springer, 2008. 470 p.
2. Roccaforte F., Leszczynski M. (eds.). *Nitride Semiconductor Technology: Power Electronics and Optoelectronic Devices*. Weinheim, Wiley-VCH, 2020. 464 p. <https://doi.org/10.1002/9783527825264>
3. Bernardini F., Fiorentini V., Vanderbilt D. Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides. *Physical Review B*, 1997, vol. 56, no. 16, pp. 24–27. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.56.R10024>
4. Yan Z., Liu G., Khan J. M., Balandin A. A. Graphene quilts for thermal management of high-power GaN transistors. *Nature Communications*, 2012, vol. 3, 827. <https://doi.org/10.1038/ncomms1828>
5. Volcheck V. S., Lovshenko I. Yu., Shandarovich V. T., Dao D. H. Gallium nitride high electron mobility transistor with an effective graphene-based heat removal system. *Doklady BGUIR*, 2020, vol. 18, no. 3, pp. 72–80 (in Russian). <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-3-72-80>
6. Wachutka G. K. Rigorous thermodynamic treatment of heat generation and conduction in semiconductor device modeling. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design*, 1990, vol. 9, no. 11, pp. 1141–1149. <https://doi.org/10.1109/43.62751>
7. Asif Khan M., Yang J.W., Knap W., Frayssinet E., Hu X., Simin G., Prystawko P., Leszczynski M., Grzegory I., Porowski S., Gaska R., Shur M.S., Beaumont B., Teisseire M., Neu G. GaN-AlGaIn heterostructure field-effect transistors over bulk GaN substrates. *Applied Physics Letters*, 2000, vol. 76, no. 25, pp. 3807–3809. <https://doi.org/10.1063/1.126788>
8. Irekti M.-R., Lesecq M., Defrance N., Okada E., Frayssinet E., Cordier Y., Tartarin J.-G., De-Jaeger J.-C. 2 W/mm power density of an AlGaIn/GaN HEMT grown on free-standing GaN substrate at 40 GHz. *Semiconductor Science and Technology*, 2019, vol. 34, no. 12, 12LT01. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ab4e74>
9. Dong Y., Xie Z., Chen D., Lu H., Zhang R., Zheng Y. Effects of dissipative substrate on the performance of enhancement mode AlInN/GaN HEMTs. *International Journal of Numerical Modeling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 2019, vol. 32, no. 1, e2482. <https://doi.org/10.1002/jnm.2482>
10. Zou J., Kotchetkov D., Balandin A. A., Florescu D. I., Pollak F.H. Thermal conductivity of GaN films: Effects of impurities and dislocations. *Journal of Applied Physics*, 2002, vol. 92, no. 5, pp. 2534–2539. <https://doi.org/10.1063/1.1497704>
11. Bi W., Kuo H.-C., Ku P.-C., Chen B. (eds.). *Handbook of GaN Semiconductor Materials and Devices*. New York, CRC Press, 2018. 708 p. <https://doi.org/10.1201/9781315152011>
12. Vandersande J. W., Wood C. The thermal conductivity of insulators and semiconductors. *Contemporary Physics*, 1986, vol. 27, no. 2, pp. 117–144. <https://doi.org/10.1080/00107518608211003>
13. Slack G. A. Nonmetallic crystals with high thermal conductivity. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1973, vol. 34, no. 2, pp. 321–335. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(73\)90092-9](https://doi.org/10.1016/0022-3697(73)90092-9)
14. Morelli D. T., Heremans J. P., Slack G. A. Estimation of the isotope effect on the lattice thermal conductivity of group IV and group III-V semiconductors. *Physical Review B*, 2002, vol. 66, no. 19, 195304. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.66.195304>

15. Florescu D. I., Asnin V. M., Pollak F. H., Molnar R. J., Wood C. E. C. High spatial resolution thermal conductivity and Raman spectroscopy investigation of hydride vapor phase epitaxy grown n-GaN/sapphire (0001): Doping dependence. *Journal of Applied Physics*, 2000, vol. 88, no. 6, pp. 3295–3300. <https://doi.org/10.1063/1.1289072>
16. Witek A. Some aspects of thermal conductivity of isotopically pure diamond – A comparison with nitrides. *Diamond and Related Materials*, 1998, vol. 7, no. 7, pp. 962–964. [https://doi.org/10.1016/S0925-9635\(97\)00336-1](https://doi.org/10.1016/S0925-9635(97)00336-1)
17. Dugdale J. S., MacDonald D. K. C. Lattice thermal conductivity. *Physical Review*, 1955, vol. 98, no. 6, pp. 1751–1752. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.98.1751>
18. Callaway J. Model for lattice thermal conductivity at low temperatures. *Physical Review*, 1959, vol. 113, no. 4, pp. 1046–1051. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.113.1046>
19. Ma J., Li W., Luo X. Examining the Callaway model for lattice thermal conductivity. *Physical Review B*, 2014, vol. 90, no. 3, 035203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.90.035203>
20. Kotchetkov D., Zou J., Balandin A. A., Florescu D. I., Pollak F. H. Effect of dislocations on thermal conductivity of GaN layers. *Applied Physics Letters*, 2001, vol. 79, no. 26, pp. 4316–4318. <https://doi.org/10.1063/1.1427153>
21. Liu W., Balandin A. A. Thermal conduction in $\text{Al}_x\text{G}_{1-x}\text{N}$ alloys and thin films. *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 97, no. 7, 073710. <https://doi.org/10.1063/1.1868876>
22. Lindsay L., Broido D. A., Reinecke T. L. Thermal conductivity and large isotope effect in GaN from first principles. *Physical Review Letters*, 2012, vol. 109, no. 9, 095901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.095901>
23. Broido D. A., Malorny M., Birner G., Mingo N., Stewart D. A. Intrinsic lattice thermal conductivity of semiconductors from first principles. *Applied Physics Letters*, 2007, vol. 91, no. 23, 231922. <https://doi.org/10.1063/1.2822891>
24. Slack G. A., Schowalter L. J., Morelli D., Freitas Jr. J. A. Some effects of oxygen impurities on AlN and GaN. *Journal of Crystal Growth*, 2002, vol. 246, no. 3–4, pp. 287–298. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(02\)2901753-0](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(02)2901753-0)
25. Jezowski A., Danilchenko B. A., Bockowski M., Grzegory I., Krukowski S., Suski T., Paszkiewicz T. Thermal conductivity of GaN crystals in 4.2–300 K range. *Solid State Communications*, 2003, vol. 128, no. 2–3, pp. 69–73. [https://doi.org/10.1016/S0038-1098\(03\)00629-X](https://doi.org/10.1016/S0038-1098(03)00629-X)
26. Ju W., Zhou Z., Wei Z. Anisotropic thermal transport property of defect-free GaN. *AIP Advances*, 2016, vol. 6, no. 6, 065328. <https://doi.org/10.1063/1.4955185>
27. Wu R., Hu R., Luo X. First-principles-based full-dispersion Monte Carlo simulation of the anisotropic phonon transport in the wurtzite GaN thin film. *Journal of Applied Physics*, 2016, vol. 119, no. 14, 145706. <https://doi.org/10.1063/1.4945776>
28. Qin Z., Qin G., Zuo X., Xiong Z., Hu M. Orbital driven low thermal conductivity of monolayer gallium nitride (GaN) with planar honeycomb structure: A comparative study. *Nanoscale*, 2017, vol. 9, pp. 4295–4309. <https://doi.org/10.1039/C7NR01271C>
29. Jiang Y., Cai S., Tao Y., Wei Z., Bi K., Chen Y. Phonon transport properties of bulk and monolayer GaN from first-principles calculations. *Computational Materials Science*, 2017, vol. 138, pp. 419–425. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2017.07.012>
30. Li W., Carrete J., Katcho N. A., Mingo N. ShengBTE: A solver of the Boltzmann transport equation for phonons. *Computer Physics Communications*, 2014, vol. 185, no. 6, pp. 1747–1758. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2014.02.015>
31. Garg J., Luo T., Chen G. Spectral concentration of thermal conductivity in GaN – A first-principles study. *Applied Physics Letters*, 2018, vol. 112, no. 25, 252101. <https://doi.org/10.1063/1.5026903>
32. Behler J., Parrinello M. Generalized neural-network representation of high-dimensional potential-energy surfaces. *Physical Review Letters*, 2007, vol. 98, no. 14, 146401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.146401>
33. Minamitani E., Ogura M., Watanabe S. Simulating lattice thermal conductivity in semiconducting materials using high-dimensional neural network potential. *Applied Physics Express*, 2019, vol. 12, no. 9, 095001. <https://doi.org/10.7567/1882-0786/ab36bc>
34. Simon R. B., Anaya J., Kuball M. Thermal conductivity of bulk GaN – Effects of oxygen, magnesium doping, and strain field compensation. *Applied Physics Letters*, 2014, vol. 105, no. 20, 202105. <https://doi.org/10.1063/1.4901967>
35. Sichel E. K., Pankove J. I. Thermal conductivity of GaN, 25–360 K. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1977, vol. 38, no. 3, p. 330. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(77\)90112-3](https://doi.org/10.1016/0022-3697(77)90112-3)
36. Maruska H. P., Tietjen J. J. The preparation and properties of vapor-deposited single-crystal-line GaN. *Applied Physics Letters*, 1969, vol. 15, no. 10, pp. 327–329. <https://doi.org/10.1063/1.1652845>
37. Asnin V. M., Pollak F. H., Ramer J., Schurman M., Ferguson I. High spatial resolution thermal conductivity of lateral epitaxial overgrown GaN/sapphire (0001) using a scanning thermal microscope. *Applied Physics Letters*, 1999, vol. 75, no. 9, pp. 1240–1242. <https://doi.org/10.1063/1.124654>
38. Luo C.-Y., Marchand H., Clarke D. R., DenBaars S. P. Thermal conductivity of lateral epitaxial overgrown GaN films. *Applied Physics Letters*, 1999, vol. 75, no. 26, pp. 4151–4153. <https://doi.org/10.1063/1.125566>
39. Florescu D. I., Asnin V. M., Pollak F. H., Jones A. M., Ramer J. C., Schurman M. J., Ferguson I. Thermal conductivity of fully and partially coalesced lateral epitaxial overgrown GaN/sapphire (0001) by scanning thermal microscopy. *Applied Physics Letters*, 2000, vol. 77, no. 10, pp. 1461–1466. <https://doi.org/10.1063/1.1308057>
40. Shibata H., Waseda Y., Ohta H., Kiyomi K., Shimoyama K., Fujito K., Nagaoka H., Kagamitani Y., Simura R., Fukuda T. High thermal conductivity of gallium nitride (GaN) crystals grown by HVPE process. *Materials Transactions*, 2007, vol. 48, no. 10, pp. 2782–2786. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MRP2007109>
41. Jagannadham K., Berkman E. A., Elmasry N. Thermal conductivity of semi-insulating, p-type, and n-type GaN films on sapphire. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2008, vol. 26, no. 3, pp. 375–379. <https://doi.org/10.1116/1.2899379>
42. Richter E., Grunder M., Schineller B., Brunner F., Zeimer U., Netzel C., Weyers M., Trankle G. GaN boules grown by high rate HVPE. *Physica Status Solidi C*, 2011, vol. 8, no. 5, pp. 1450–1454. <https://doi.org/10.1002/pssc.201000901>

Information about the authors

Vladislav S. Volchek – Researcher, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0001-6942-810X>. E-mail: vlad.volchek@bsuir.by

Maryia S. Baranova – Researcher, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-2618-4464>. E-mail: baranova@bsuir.by

Viktor R. Stempitsky – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Vice-Rector for Research and Development, Head of Research and Development Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0001-9362-7539>. E-mail: vstem@bsuir.by

Информация об авторах

Волчэк Владислав Сергеевич – научный сотрудник, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0001-6942-810X>. E-mail: vlad.volchek@bsuir.by

Баранова Мария Сергеевна – научный сотрудник, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-2618-4464>. E-mail: baranova@bsuir.by

Стемпіцкіі Віктор Романовіч – кандидат технических наук, доцент, проректор по научной работе, начальник научно-исследовательской части, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0001-9362-7539>. E-mail: vstem@bsuir.by

Г. С. Маршалова^{1,2}, Т. А. Баранова¹, Ю. В. Жукова¹, А. Д. Чорный¹, А. Б. Сухоцкий²,
Е. С. Данильчик^{1,2}, А. А. Миронов³, Р. А. Кадыров³, И. А. Попов³

¹*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

²*Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь*

³*Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева – КАИ, Казань, Российская Федерация*

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ С ВЫТЯЖНОЙ ШАХТОЙ

Аннотация. Представлены результаты численного исследования теплоаэродинамических характеристик аппаратов воздушного охлаждения с установленной вытяжной шахтой. Исследования проведены для аппаратов воздушного охлаждения с четырехрядными пучками оребренных труб, установленных в шахматном порядке. Численное моделирование осуществлялось с использованием газодинамического решателя Ansys Fluent. Для замыкания уравнений Рейнольдса применялись $k-\omega$ модели переноса сдвиговых напряжений Ментера. Полученные численные результаты позволили визуализировать течение воздуха в пучке и вытяжной шахте, установить неравномерность скоростей и температур. Показано, что распределение температуры в потоке, проходящем через вытяжную шахту, зависит от высоты вытяжной шахты. Установлено, что при малых высотах шахты в следе за пучком из-за колебательного движения следа формируется динамическая и температурная неоднородность, которая приводит к подосу холодного воздуха через шахту из окружающей среды. При увеличении высоты шахты температурная неоднородность сдвигается вверх по ходу воздуха в шахте, и неустойчивость затухает. Получено, что максимальная теплоотдача при одинаковых гидравлических потерях достигается при установке шахты с высотой $H > 1,16$ м. Полученные результаты могут быть использованы для модернизации существующих аппаратов воздушного охлаждения, а также при проектировании новых аппаратов с вытяжной шахтой.

Ключевые слова: аппарат воздушного охлаждения, вытяжная шахты, свободная конвекция, численное моделирование, модель переноса сдвиговых напряжений Ментера, число Нуссельта, число Эйлера

Для цитирования: Численное исследование теплообмена и аэродинамического сопротивления аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой / Г. С. Маршалова [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2022. – Т. 67, № 3. – С. 298–306. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-298-306>

Galina S. Marshalova^{1,2}, Tatiana A. Baranova¹, Yulia V. Zhukova¹, Andrei D. Chorny¹, Al'bert B. Sukhotsky²,
Ekaterina S. Danil'chik^{1,2}, Aleksandr A. Mironov³, Ruslan G. Kadyrov³, Igor A. Popov³

¹*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

²*Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus*

³*Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russian Federation*

NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER AND HYDRAULIC LOSSES OF AIR-COOLED EXHAUST-SHAFT APPARATUSES

Abstract. The article presents the numerical simulation results on heat transfer and hydraulic losses of air-cooled exhaust-shaft apparatuses. Studies were made on air-cooled apparatuses in which four-row bundles of staggered finned tubes were placed. Numerical simulation used a gas dynamic solver Ansys Fluent. Menter's shear stress transport $k-\omega$ model was invited to close the Reynolds equations. The obtained numerical results allowed us to visualize air flow in the bundle and the exhaust shaft, as well as to establish an inhomogeneous distribution of velocities and temperatures. We found that the temperature distribution in the flow passing through the exhaust shaft depends on the height of the exhaust shaft. We also established that at small shaft heights in the wake behind a bundle because of the wake oscillatory motion, the dynamic and temperature inhomogeneous distributions take place, resulting in the cold air suction through the shaft from the environment. With an increase in the shaft height, the inhomogeneous temperature distribution moves upstream the air flow in the shaft and the inhomogeneous temperature distribution attenuates. We can say that maximum heat transfer at the same hydraulic losses is achieved when mounting a shaft with a height of $H > 1.16$ m. The results obtained can be used for the modernization of existing air-cooled apparatus, as well as for the design of new devices with an exhaust shaft.

Keywords: air-cooled apparatus, free convection, numerical simulation, Menter's shear stress transport model, Nusselt number, Euler number

For citation: Marshalova G. S., Baranova T. A., Zhukova Yu. V., Chorny A. D., Sukhotsky A. B., Danil'chik E. S., Mironov A. A., Kadyrov R. G., Popov I. A. Numerical simulation of heat transfer and hydraulic losses of air-cooled exhaust-shaft apparatuses. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 3, pp. 298–306 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-298-306>

Введение. Аппараты воздушного охлаждения (АВО) являются составной частью оборудования тепло-технологических процессов в нефтеперерабатывающей, химической, нефтехимической, газовой и пищевой промышленности, а также применяются на автомобильных газонаполнительных компрессорных станциях [1], в тепло- и электроэнергетике [3, 4], в холодильной технике, деревообрабатывающей промышленности [5], на атомных станциях [6]. По данным [7] в странах Евразийского экономического союза в настоящее время работает около 52 000 АВО с установленной мощностью $1,93 \cdot 10^6$ кВт.

Для оптимизации работы АВО используются различные подходы и методы: как активные (например, установка вентиляторов, ионизация воздуха на входе в камеру АВО), так и пассивные (к примеру, развитие площади теплопередающей поверхности, изменения режима течения в камере АВО за счет профилирования геометрической формы камеры за пучком теплопередающих труб и др.). При профилировании геометрической формы камеры за теплообменным пучком, в частности при установке вытяжной шахты, изменяется характер течения воздуха, то есть функционально работа вытяжной шахты в качестве побудителя движения воздуха через теплообменные секции качественно подобна всасывающему действию вентилятора. Принципиальное отличие между способами ускорения потока в камере с теплообменными трубами состоит в том, что установка шахты не требует подвода энергии извне в явном виде и, таким образом, осуществляется интенсификация теплообмена в пучках секций пассивным способом, конечным результатом которого является соответствующая величина энергосбережения. Также применение вытяжной шахты позволяет исключить рециркуляцию воздуха в теплообменнике и повышает срок службы вентиляторов с приводами.

При эксплуатации АВО с вытяжной шахтой необходимо строго соблюдать температурные режимы и точно их регулировать [8]. Для этого необходима достоверная информация о характере теплоотдачи пучков оребренных труб в режимах естественной и смешанной конвекции воздуха. Однако в настоящее время отсутствуют методики теплового расчета АВО в этих режимах, а известные исследования смешанной конвекции воздуха [9–14] не охватывают распространенных компоновочных параметров пучков, не учитывают влияния аэродинамических характеристик и геометрических параметров вытяжной шахты, не предлагают рекомендаций на проектирование АВО.

При этом осуществление экспериментальных исследований по изучению свободной и смешанной конвекции требует значительных расходов на реализацию, высокой мощности оборудования, а также больших временных затрат. Проведение экспериментальной визуализации структуры течения в камере АВО затруднено, поскольку накладываются значительные требования как на соблюдение фиксированного температурного режима, так и на оборудование для визуализации. Поэтому экспериментально охватить весь желаемый диапазон вариантов компоновок пучков, режимов конвективного теплообмена и методов интенсификации теплообмена, а также провести визуализацию структуры течения в камере не представляется возможным. Решением этой проблемы может выступить применение методов вычислительной газодинамики (CFD – computational fluid dynamics), которые позволяют расширить границы экспериментальных исследований.

Цель данного исследования – численное исследование конвективного теплообмена четырехрядных шахматных равносторонних пучков аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой, а также оценка влияния использования вытяжной шахты на теплоотдачу пучков оребренных труб в режимах естественной и смешанной конвекции воздуха.

Методы исследования. Сопоставление численных исследований с экспериментальными проводились для модели АВО, состоящей из четырех рядов ($z = 4$) шахматно расположенных оребренных труб с диаметром несущей трубы $d_0 = 0,0264$ м. Поперечный шаг пучка составлял $S_1 = 0,058$ м (безразмерный шаг $S_1/d_0 = 2,2$). Трубы в пучке имели следующие геометрические параметры: наружный диаметр трубы с оребрением $d/d_0 = 2,152$; высота ребра $h/d_0 = 0,576$; межреберный шаг $s/d_0 = 0,092$; толщина ребра $\Delta/d_0 = 0,0208$; длина трубы $l/d_0 = 11,36$; коэффициент оребрения $\phi = 21$. Высота вытяжной шахты варьировалась в пределах $H = 0,52$ – $2,12$ м, диаметр выходного отверстия вытяжной шахты оставался постоянным и был равен $d_{\text{отв.}} = 0,105$ м. Подробное описание методики экспериментальных исследований изложено в [15–17].

Верификация расчетного алгоритма проводилась для АВО с вытяжной шахтой со следующими геометрическими размерами $d_{\text{отв.}} = 0,105$ м, $H = 1,16$ м. Затем по верифицированной методике осуществлялись расчеты конвективного теплообмена шахматного пучка оребренных труб для различных высот вытяжной шахты.

Поставленная задача решалась в трехмерной постановке. Размеры расчетной области составляли $4 \times 3,8 \times 0,00972$ м³. Неструктурированная расчетная сетка (рис. 1) генерировалась с использованием пакета Ansys Meshing. При построении сетки учитывался тот факт, что вблизи стенок на размер генерируемой ячейки, согласно [18] накладывается условие $y^+ \in [1; 5]$. Чтобы описать рабочую область потребовалось порядка 30 млн тетрагексагональных ячеек.

Для достижения поставленной цели решались стационарные уравнения Навье–Стокса, осредненные по Рейнольдсу (уравнения Рейнольдса), уравнение неразрывности и уравнение энергии в формулировке для энтальпии [19]. Как показали верификационные расчеты, число Рейнольдса, построенное по диаметру несущей трубы и скорости на входе в расчетную область, соответствует ламинарному режиму течения. Однако, согласно рекомендациям [20], для задач естественной и смешанной конвекции необходимо решать уравнения Рейнольдса. Замыкание уравнений Рейнольдса осуществлялось с помощью k - ω модели переноса сдвиговых напряжений Ментера [21].

В экспериментах нагрев трубы осуществлялся электрическим током, мощность источника тепловыделения определялась как произведение силы тока на напряжение. Поэтому для согласования с экспериментом, на внутренней поверхности несущей трубы задавалось значение теплового потока. Поскольку размеры расчетной области значительно превосходили размеры объекта исследования, то нам представилось возможным на выходе из расчетной области установить



Рис. 1. Фрагменты расчетной сетки на поверхности трубы и в расчетной области

Fig. 1. Fragments of the computational grid on the pipe surface and in the computational domain

мягкие граничные условия, то есть равенство нулю градиентов рассчитываемых величин. Стенки шахты предполагались теплоизолированными. В начале расчета во всей расчетной области задавалось статическое давление, равное атмосферному, $P = 101\,325$ Па, и температура воздуха, равная температуре окружающей среды, измеренной экспериментально, $T_{вх} = t_0$. Численное моделирование теплопередачи от оребренных труб к воздуху осуществлялось в сопряженной постановке.

Сопоставление численных и экспериментальных данных проводилось по следующим величинам: средняя температура ребра нагреваемой оребренной трубы в каждом ряду пучка T_i ; температура воздуха на выходе из вытяжной шахты $T_{вых}$. Сравнение результатов эксперимента и численного моделирования представлено в виде зависимости температур на ребре T_i (рис. 2, *a*) и в выходном сечении вытяжной шахты (рис. 2, *b*) от плотности теплового потока для $d_{отв.} = 0,105$ м, $H = 1,16$ м.

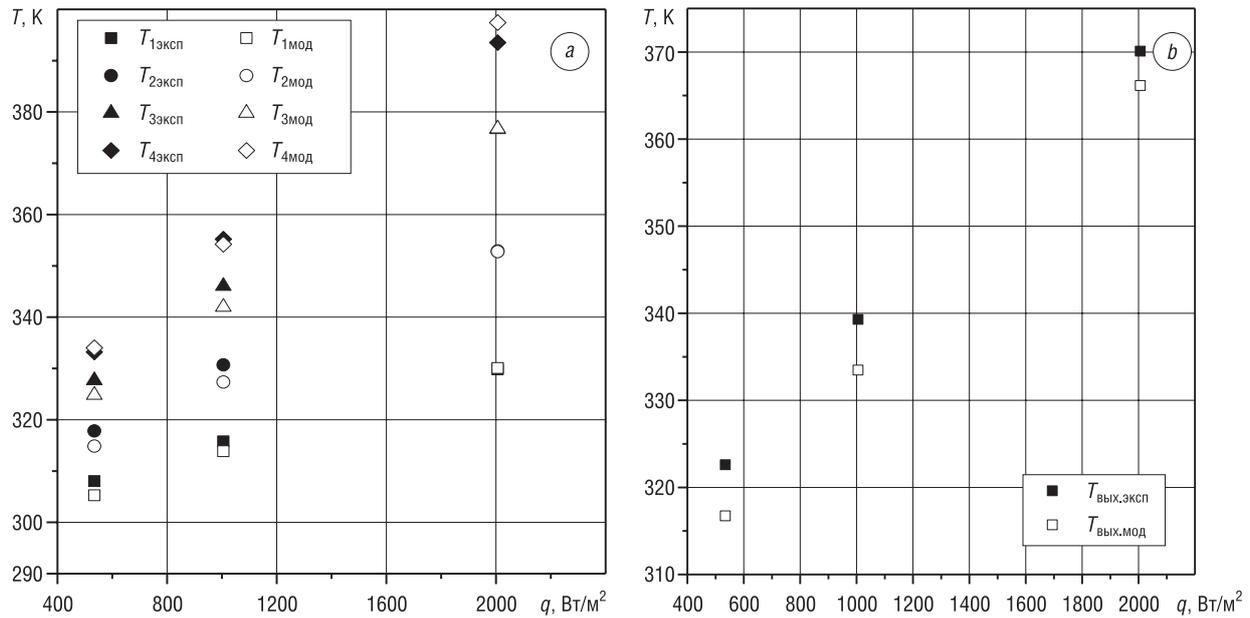


Рис. 2. Сравнение результатов эксперимента и численного моделирования: *a* – по температурам на трубах, *b* – по температурам на выходе из вытяжной шахты

Fig. 2. Comparison of experimental and numerical simulation results: *a* – by the temperatures on the tubes, *b* – by the temperatures at the outlet of the exhaust shaft

Результаты и их обсуждение. Полученные результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными (расхождение результатов не превышает 5%). Предполагается использование разработанной методики для расширения границ параметров эксперимента и визуализации структуры течения в многорядных пучках труб с различными компоновками.

Численное исследование теплообмена и визуализация структуры течения за пучком в режиме смешанной конвекции было проведено для четырехрядных шахматных пучков, за которыми устанавливалась вытяжная шахта с постоянным диаметром $d_{отв.} = 0,105$ м и переменной высотой $H = 0,52; 1,48; 2,12$ м. Для случая каждой высоты вытяжной шахты численное моделирование осуществлялось для значений теплового потока на оребренной трубе, равных экспериментальным.

Распределение температур на поверхности труб в пучке и воздуха в шахте показано на рис. 3. Для каждой используемой вытяжной шахты оно имеет идентичный характер.

Как видно из рис. 3, первый ряд пучка охлаждается наилучшим образом, так как температура поступающего воздуха имеет наименьшее значение. По мере продвижения воздуха через пучок температура повышается за счет конвективного и радиационного нагрева от оребренных труб, и температура четвертого ряда и потока за ним является самой высокой.

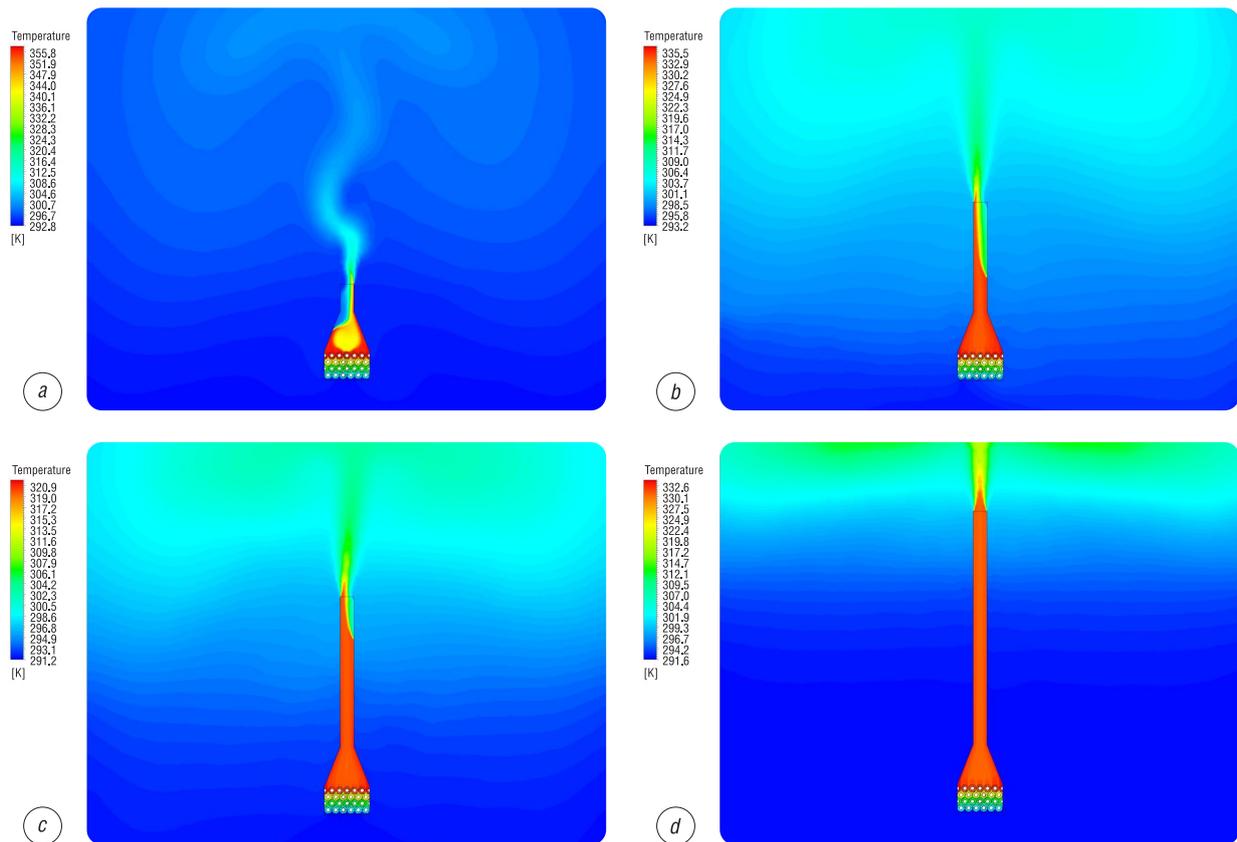


Рис. 3. Распределение температур на пучке и в вытяжной шахте: $a - H = 0,52$ м, $q = 534$ Вт/м²; $b - H = 1,16$ м, $q = 1005$ Вт/м²; $c - H = 1,48$ м, $q = 422$ Вт/м²; $d - H = 2,12$ м, $q = 1093$ Вт/м²

Fig. 3. Temperature distribution on the beam and in the exhaust shaft: $a - H = 0.52$ m, $q = 534$ W/m²; $b - H = 1.16$ m, $q = 1005$ W/m²; $c - H = 1.48$ m, $q = 422$ W/m²; $d - H = 2.12$ m, $q = 1093$ W/m²

Характер распределения температур в потоке, проходящем через вытяжную шахту, зависит от ее высоты. Для $H = 0,52$ м наблюдается неравномерность распределения температур непосредственно над пучком. С увеличением плотности теплового потока и высоты вытяжной шахты данная зона неравномерности смещается вверх по шахте, для ее высоты $H = 2,12$ м неоднородности не наблюдается и температура воздуха на выходе из оребренного пучка равна температуре на выходе из вытяжной шахты. Для объяснения данного явления необходимо совместно с распределением температуры рассматривать и распределение скорости в следе за пучком оребренных труб и в вытяжной шахте (рис. 4).

Из-за значительного загромождения канала пучком оребренных труб след за пучком формируется как за плохо обтекаемым телом. В [21–23] показано, что при размещении пакета труб в узком канале расстояние от труб до стенки обуславливает формирование трех режимов обтекания, причем при малом расстоянии от стенок канала до стенок труб пакет труб обтекается как одно плохо обтекаемое тело. Таким образом, след за пучком будет формироваться в условиях малых скоростей потока воздуха, близости стенок канала к пучку оребренных труб и конфузурного входа в шахту.

Как показано на рис. 3, a и 4, a , при высоте шахты $H = 0,52$ м в следе за пучком образуется один вихрь, который, попадая в конфузурный вход в шахту, формирует динамическую и температурную неоднородность, возникновение которой связано с колебательным движением следа. Такое движение приводит к подосу холодного воздуха через шахту из окружающей среды. При увеличении высоты шахты за счет увеличивающегося разрежения в следе неоднородность сдвигается вверх по ходу воздуха в шахте (рис. 3, b , c – рис. 4, b , c). Для максимальной высоты шахты (рис. 3, d – рис. 4, d) потери давления позволяют свести на нет сформировавшуюся неустойчивость.

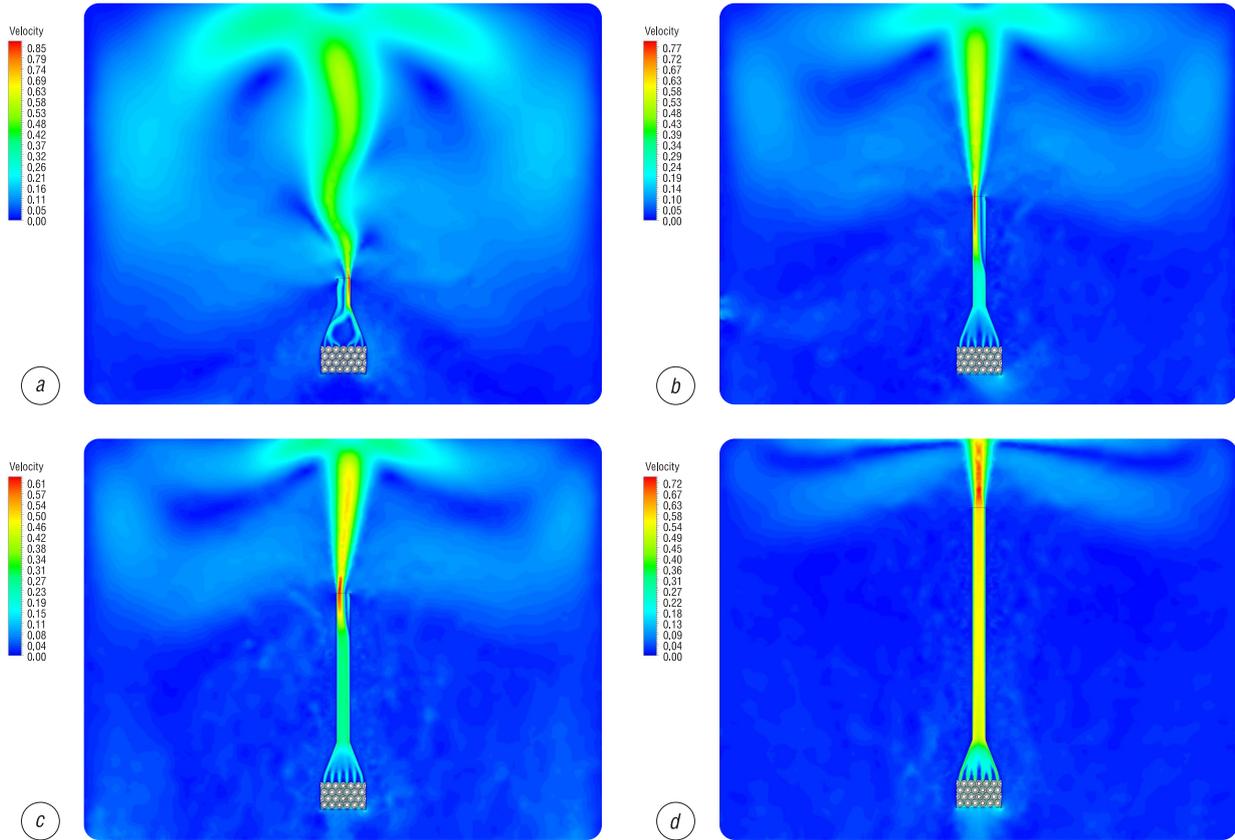


Рис. 4. Распределение скоростей на пучке и в вытяжной шахте: *a* – $H = 0,52$ м, $q = 534$ Вт/м²; *b* – $H = 1,16$ м, $q = 1005$ Вт/м²; *c* – $H = 1,48$ м, $q = 422$ Вт/м²; *d* – $H = 2,12$ м, $q = 1093$ Вт/м²

Fig. 4. Velocity distribution on the beam and in the exhaust shaft: *a* – $H = 0.52$ m, $q = 534$ W/m²; *b* – $H = 1.16$ m, $q = 1005$ W/m²; *c* – $H = 1.48$ m, $q = 422$ W/m²; *d* – $H = 2.12$ m, $q = 1093$ W/m²

Поскольку интенсификация теплообменных процессов организована только за счет установки вытяжной шахты, то для оценки эффективности действия шахты можно представить суммарную теплоотдачу пучка труб Nu в виде зависимости от гидравлических потерь Eu (рис. 5):

$$Nu = \frac{\alpha d_0}{\lambda}, \quad (1)$$

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho U_{in}^2}, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи пучка, Вт/(м²°С); λ – теплопроводность, Вт/(м °С); ΔP – перепад давлений, Па; U_{in} – скорость воздуха в сжатом сечении пучка, м/с.

Как показано на рис. 5, максимальная теплоотдача при одинаковых гидравлических потерях достигается при установке шахты с высотой $H > 1,16$ м. Необходимо отметить, что зависимость $Nu = f(Eu)$ имеет неодинаковый темп при разной высоте шахты.

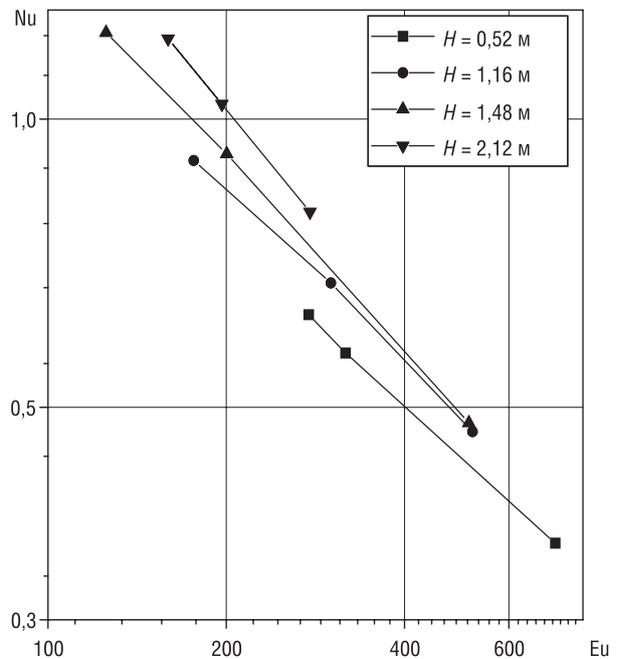


Рис. 5. Теплогидравлическая эффективность оребренных трубных пучков с вытяжной шахтой

Fig. 5. Thermohydraulic efficiency of finned tube bundles with exhaust shaft

Заклучение. Проведено численное исследование теплоотдачи и аэродинамического сопротивления четырехрядных шахматных равносторонних пучков оребренных труб для аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой. Полученные результаты позволили визуализировать структуру течения воздуха в пучке и вытяжной шахте, установить причину возникающих неравномерностей скоростей и температур. Обработка результатов в виде $Nu = f(Eu)$ позволяет оценить эффективность шахты как интенсификатора теплообмена при свободной и смешанной конвекции.

Полученные результаты могут быть использованы для модернизации существующих аппаратов воздушного охлаждения, а также при проектировании новых аппаратов с вытяжной шахтой.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проекты T21PM-019 и F21MC-011) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-58-04002).

Acknowledgements

The work was carried out with the financial support of the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (projects T21RM-019 and F21MS-011) and the Russian Foundation for Basic Research (project 20-58-04002).

Список использованных источников

1. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: справочник / А. Н. Бессонный [и др.]; под ред. А. Н. Бессонного, В. Б. Кунтыша. – СПб.: Недра, 1996. – 512 с.
2. Королев, И. И. О комбинированных системах охлаждения ТЭЦ / И. И. Королев, Е. В. Генова, С. Е. Бенклян // Теплоэнергетика. – 1996. – № 11. – С. 49–55.
3. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю. А. Быстров [и др.]. – СПб.: Судостроение, 2005. – 392 с.
4. Combined air-cooled condenser layout with in line configured finned tube bundles to improve cooling performance / Y. Q. Kong [et al.] // Appl. Therm. Eng. – 2019. – Vol. 154. – P. 505–518. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.099>
5. Теплоотдача естественной конвекцией одиночного ряда вертикальных оребренных труб калориферов лесосушильных камер / В. Б. Кунтыш [и др.] // Лесн. журн. – 2002. – № 2. – С. 116–121.
6. Зорин, В. М. Атомные электростанции: учеб. пособие / В. М. Зорин. – М.: Изд. дом МЭИ, 2012. – 672 с.
7. Инженерный метод теплового расчета аппарата воздушного охлаждения в режиме свободно-конвективного теплообмена / В. Б. Кунтыш [и др.] // Хим. и нефтегаз. машиностроение. – 2013. – № 12. – С. 3–6.
8. Самородов, А. В. Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками: дис. ... канд. техн. наук / А. В. Самородов. – Архангельск, 1999. – 176 л.
9. Cheng, T. S. Characteristics of mixed convection heat transfer in a lid-driven square cavity with various Richardson and Prandtl numbers / T. S. Cheng // Int. J. Therm. Sci. – 2011. – Vol. 50, № 2. – P. 197–205. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.09.012>
10. Мартыненко, О. Г. Теплообмен смешанной конвекцией / О. Г. Мартыненко, Ю. А. Соковишин. – Минск: Наука и техника, 1975. – 256 с.
11. Мильман, О. О. Экспериментальное исследование теплообмена при естественной циркуляции воздуха в модели воздушного конденсатора с вытяжной шахтой / О. О. Мильман // Теплоэнергетика. – 2005. – № 5. – С. 16–19.
12. Васильев, Ю. Н. Системы охлаждения компрессорных и нефтеперекачивающих станций / Ю. Н. Васильев, Г. А. Марголин. – М.: Недра, 1977. – 222 с.
13. Габдрахманов, А. А. Повышение эффективности эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения на магистральных газопроводах: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. А. Габдрахманов; Уфим. гос. нефт. техн. ун-т. – Уфа, 2007. – 24 с.
14. 3D CFD simulations of air cooled condenser-II: Natural draft around a single finned tube kept in a small chimney / A. Kumar [et al.] // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2016. – Vol. 92. – P. 507–522. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.136>
15. Маршалова, Г. С. Тепловой расчет и проектирование аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой: дис. ... канд. техн. наук / Г. С. Маршалова. – Минск, 2019. – 153 л.
16. Маршалова, Г. С. Повышение энергосбережения в аппаратах воздушного охлаждения интенсификацией внешнего теплообмена / Г. С. Маршалова, А. Б. Сухоцкий, В. Б. Кунтыш // Хим. и нефтегаз. машиностроение. – 2020. – № 2. – С. 3–7.
17. Маршалова, Г. С. Аэродинамическое сопротивление при малых числах Рейнольдса и методика расчета скорости воздуха в одно- и многорядных оребренных пучках с вытяжной шахтой / Г. С. Маршалова, А. Б. Сухоцкий // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2021. – Т. 57, № 1. – С. 108–118. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-1-108-118>
18. Durbin, P. A. Statistical Theory and Modeling for Turbulent Flows / P. A. Durbin, B. A. Pettersson-Reif. – Willey, 2001. – 367 p.
19. ANSYS Fluent Theory Guide. Release 15.0 [Electronic resource]. – 2013. – Mode of access: <http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide%2015.pdf> – Date of access: 16.04.2022.
20. Menter, F. R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model / F. R. Menter, M. Kuntz, R. Langtry // Turbulence. Heat and Mass Transfer. – 2003. – Vol. 4. – P. 625–632.

21. Alam, Md. Mahbub. Aerodynamic characteristics of two side-by-side circular cylinders and application of wavelet analysis on the switching phenomenon / Md. Mahbub Alam, M. Moriya, H. Sakamoto // *J. Fluids and Structures*. – 2003. – Vol. 18, №3–4. – P. 325–346. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2003.07.005>
22. Alam, Md. Mahbub. Flow around two side-by-side closely spaced circular cylinders / Md. Mahbub Alam, Y. Zhou // *J. Fluids and Structures*. – 2007. – Vol. 23, №5. – P. 799–805. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2006.12.002>
23. Жукова, Ю.В. Конвективный теплообмен и аэродинамическое сопротивление двух расположенных бок о бок труб в узком канале при различных числах Рейнольдса / Ю.В. Жукова, А.М. Терех, А.И. Руденко // Докл. Нац. акад. наук Беларусі. – 2018. – Т. 62, №6. – С. 756–762.

References

1. Bessonnyi A. N., Kuntyshev V. B., eds. *Basics of Calculation and Design of Air Cooling Heat Exchangers*. St. Petersburg, Nedra Publ., 1996. 512 p. (in Russian).
2. Korolev I. I., Genova E. V., Benklyan S. E. On combined CHPP cooling systems. *Teploenergetika = Thermal Power Engineering*, 1996, no. 11, pp. 49–55 (in Russian).
3. Bystrov Ju. A., Isaev S. A., Kudryavtsev N. A., Leont'ev A. I. *Numerical Modeling of Vortex Intensification of Heat Transfer in Tube Bundles*. St. Petersburg, Sudostroenie Publ., 2005. 392 p. (in Russian).
4. Kong Y., Wang W., Zuo Z., Yang L., Du X., Yang Y. Combined air-cooled condenser layout with in line configured finned tube bundles to improve cooling performance. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 154, pp. 505–518. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.099>
5. Kuntyshev V. B., Pozdnyakova A. V., Melehev V. I. Heat transfer by natural convection of a single row of vertical finned pipes of heaters of drying chambers. *Lesnoi zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2002, no. 2, pp. 116–121 (in Russian).
6. Zorin V. M. *Nuclear Power Plants*. Moscow, MEI Publ., 2012. 672 p. (in Russian).
7. Kuntyshev V. B., Samorodov A. V., Sukhotskii A. B. Engineering method of thermal calculation of the air cooling apparatus in the mode of free-convective heat exchange. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie = Chemical and Petroleum Engineering*, 2013, no. 12, pp. 3–6 (in Russian).
8. Samorodov A. V. *Improving the Methods of Thermal Calculation and Design of Air Cooling Devices with Checkerboard Finned Bundles*. Arkhangelsk, 1999. 176 p. (in Russian).
9. Cheng T. S. Characteristics of mixed convection heat transfer in a lid-driven square cavity with various Richardson and Prandtl numbers. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, vol. 50, no. 2, pp. 197–205. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.09.012>
10. Martynenko O. G., Sokovishin Yu. A. *Heat Exchange by Mixed Convection*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1975. 256 p. (in Russian).
11. Mil'man O. O. Experimental study of heat exchange during natural air circulation in the model of an air condenser with an exhaust shaft. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, 2005, no. 5, pp. 16–19 (in Russian).
12. Vasil'ev Yu. N., Margolin G. A. *Cooling Systems of Compressor and Oil Pumping Stations*. Moscow, Nedra Publ., 1977. 222 p. (in Russian).
13. Gabdrakhmanov A. A. *Improvement of the Efficiency of the Equipment for Air Cooling Apparatus on the Main Conductors*. Ufa, 2007. 24 p. (in Russian).
14. Kumar A., Joshi J. B., Nayak A. K., Vijayan P. K. 3D CFD simulations of air cooled condenser-II: Natural draft around a single finned tube kept in a small chimney. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 92, pp. 507–522. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.136>
15. Marshalova G. S. *Thermal Design and Making of Air-Cooled Exhaust Shaft Apparatus*. Minsk, 2019. 153 p. (in Russian)
16. Marshalova G. S., Sukhotskii A. B., Kuntyshev V. B. Enhancing Energy Saving in Air Cooling Devices by Intensifying External Heat Transfer. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie = Chemical and Petroleum Engineering*, 2020, no. 2, pp. 3–7 (in Russian).
17. Marshalova G. S., Sukhotskii A. B. Aerodynamic drag at small Reynolds numbers and the method of calculation of the air velocity in one- and many-row finned beams with an exhaust shaft. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2021, vol. 57, no. 1, pp. 108–118 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-1-108-118>
18. Durbin P. A., Pettersson-Reif B. A. *Statistical Theory and Modeling for Turbulent Flows*. Willey, 2001. 367 p.
19. *ANSYS Fluent Theory Guide. Release 15.0* (2013). Available at: <http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notas-modelosgrad/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide%2015.pdf> (accessed 16 April 2022).
20. Menter F. R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. *Turbulence. Heat and Mass Transfer*, 2003, vol. 4, pp. 625–632.
21. Alam Md. Mahbub, Moriya M., Sakamoto H. Aerodynamic characteristics of two side-by-side circular cylinders and application of wavelet analysis on the switching phenomenon. *Journal of Fluids and Structures*, 2003, vol. 18, no. 3–4, pp. 325–346. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2003.07.005>
22. Alam Md. Mahbub, Zhou Y. Flow around two side-by-side closely spaced circular cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, 2007, vol. 23, no. 5, pp. 799–805. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2006.12.002>
23. Zhukova Yu. V., Terekh A. M., Rudenko A. I. Convective heat transfer and drag of two side-by-side tubes in the narrow channel at different Reynolds number. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 6, pp. 756–762 (in Russian).

Информация об авторах

Маршалова Галина Сергеевна – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории турбулентности, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь); ассистент кафедры, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0003-4635-6144>. E-mail: galiana.sidorik@gmail.com

Баранова Татьяна Анатольевна – научный сотрудник лаборатории турбулентности, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-4413-8904>. E-mail: bartat@tut.by

Жукова Юлия Владимировна – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории турбулентности, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0003-1219-6373>. E-mail: julia_zhukova@rambler.ru

Чорный Андрей Дмитриевич – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией турбулентности, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0003-4716-6123>. E-mail: anchor74@rambler.ru

Сухоцкий Альберт Борисович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-5503-7471>. E-mail: alk2905@mail.ru

Данильчик Екатерина Сергеевна – ассистент кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь); младший научный сотрудник лаборатории турбулентности, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: katya.156.156@gmail.com

Миронов Александр Александрович – инженер, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева – КАИ (ул. К. Маркса, 10, 420111, Казань, Российская Федерация). E-mail: alexander1993@mail.ru

Кадыров Руслан Газинурович – аспирант, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева – КАИ (ул. К. Маркса, 10, 420111, Казань, Российская Федерация). E-mail: adres.krg@mail.ru

Попов Игорь Александрович – член-корреспондент Академии наук Республики Татарстан, доктор технических наук, профессор, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева – КАИ (ул. К. Маркса, 10, 420111, Казань, Российская Федерация). <https://orcid.org/0000-0002-1700-7896>. E-mail: popov-igor-alex@yandex.ru

Information about the authors

Galina S. Marshalova – Ph. D. (Engineering), Scientific Researcher of the Laboratory of Turbulence, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus); Assistant of the Department, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0003-4635-6144>. E-mail: galiana.sidorik@gmail.com

Tatiana A. Baranova – Researcher of the Laboratory of Turbulence, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-4413-8904>. E-mail: bartat@tut.by

Yulia V. Zhukova – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Turbulence, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0003-1219-6373>. E-mail: julia_zhukova@rambler.ru

Andrei D. Chorny – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of the Laboratory of Turbulence, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0003-4716-6123>. E-mail: anchor74@rambler.ru

Al'bert B. Sukhotskii – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-5503-7471>. E-mail: alk2905@mail.ru

Ekaterina S. Danil'chik – Junior Researcher, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus); Junior Scientific Researcher of the Laboratory of Turbulence, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: katya.156.156@gmail.com

Aleksandr A. Mironov – Engineer, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (10, K. Marx Str., 420111, Kazan, Russian Federation). E-mail: alexander1993@mail.ru

Ruslan G. Kadyrov – Postgraduate Student, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (10, K. Marx Str., 420111, Kazan, Russian Federation). E-mail: adres.krg@mail.ru

Igor A. Popov – Corresponding Member of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, D. Sc. (Engineering), Professor, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (10, K. Marx Str., 420111, Kazan, Russian Federation). <https://orcid.org/0000-0002-1700-7896>. E-mail: popov-igor-alex@yandex.ru

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 621.43.065.001.57

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-307-317>

Поступила в редакцию 18.02.2022

Received 18.02.2022

В. Я. Груданов, Л. Т. Ткачева, Г. И. Белохвостов, М. В. Бренч, А. А. Пинчук, В. В. Русских*Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь***ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ УТИЛИЗАЦИИ ЭНЕРГИИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЛУШИТЕЛЕЙ ШУМА**

Аннотация. Представлены научные основы проектирования глушителей шума двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с утилизацией теплоты отработавших газов, обеспечивающих выпуск газовых потоков с улучшенными газодинамическими и акустическими характеристиками. Изучен термодинамический анализ процессов утилизации энергии отработавших газов. Термодинамический анализ показал, что утилизация теплоты отработавших газов приводит к повышению термического коэффициента полезного действия (КПД) цикла Отто. Выполнен также эксергетический анализ теплообменных процессов в глушителе и определены пути повышения его термодинамической эффективности. Установлено, что глушитель шума с размещенным внутри теплообменником-змеевиком с позиции второго закона термодинамики, выраженного посредством эксергетического анализа, является более совершенной термодинамической системой по сравнению с обычным глушителем. Дано математическое описание процессов утилизации в условиях внешнего теплового воздействия, при этом выявлен характер влияния теплового воздействия на изменение давления, температуры и плотности. На основе метода Л. А. Вулиса получены аналитические уравнения изменения давления, температуры и плотности. Процессы утилизации энергии отработавших газов способствуют снижению температуры газов, возрастанию плотности, уменьшению скорости потока и падению давления, то есть имеет место эффект (закон Л. А. Вулиса) теплового торможения газового потока, обуславливающего снижение уровня шума при меньшем противодавлении и увеличении КПД двигателя.

Ключевые слова: глушители шума, двигатель внутреннего сгорания, отработавшие газы, утилизационный теплообменник, термодинамический анализ, эксергия, энтропия

Для цитирования: Влияние процессов утилизации энергии отработавших газов поршневых двигателей внутреннего сгорания на газодинамические и акустические характеристики глушителей шума / В. Я. Груданов [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, №3. – С. 307–317. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-307-317>

Vladimir Ya. Grudanov, Ludmila T. Tkacheva, Guennadi I. Belokhvostov, Marina V. Brench, Anna A. Pinchuk, Viktor V. Russkikh*Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus***THE INFLUENCE OF THE PROCESSES OF UTILIZATION OF EXHAUST GASES OF RECIPROCATING INTERNAL COMBUSTION ENGINES ON THE GAS DYNAMIC AND ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF NOISE SILENCERS**

Abstract. The scientific basis for the design of noise suppressors for internal combustion engines with exhaust gas heat recovery, providing the release of gas flows with improved gas-dynamic and acoustic characteristics, is presented. The thermodynamic analysis of the processes of energy utilization of exhaust gases has been studied. Thermodynamic analysis showed that the utilization of exhaust gas heat leads to an increase in the coefficient of performance (COP) of the Otto cycle. An exergy analysis of heat exchange processes in the muffler was also carried out, and ways to increase its thermodynamic efficiency were determined. It has been established that a noise silencer with a heat exchanger-coil installed inside, from the position of the second law of thermodynamics, expressed by means of exergy analysis, is a more advanced thermodynamic system compared to a conventional silencer. A mathematical description of the recycling processes under conditions of external thermal exposure is given, while the nature of the influence of thermal exposure on changes in pressure, temperature and density is established. Based on the method of L. A. Vulis analytical equations for changes in pressure, temperature and density are obtained. Exhaust gas energy recovery processes contribute to a decrease in gas temperature, an increase in density, a decrease in flow velocity and a pressure drop, i.e. there is an effect (law of L. A. Vulis) of thermal stagnation of the gas flow, which causes a decrease in the noise level with less back pressure and an increase in engine efficiency.

Keywords: noise mufflers, internal combustion engine, exhaust gases, recycling heat exchanger, thermodynamic analysis, exergy, entropy

For citation: Grudanov V. Ya., Tkacheva L. T., Belokhvostov G. I., Brench M. V., Pinchuk A. A., Russkikh V. V. The influence of the processes of utilization of exhaust gases of reciprocating internal combustion engines on the gas dynamic and acoustic characteristics of noise silencers. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 3, pp. 307–317 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-307-317>

Введение. Как известно, отработавшие газы составляют около 60 % всей эмиссии автотранспортного средства и содержат в своем составе окислы азота NO_x , окись углерода CO , двуокись углерода CO_2 , водяные пары H_2O , частично или полностью несгоревшие углеводороды C_mH_n , окислы серы SO_x , компоненты свинца и другие вещества в зависимости от вида и сорта сжигаемого топлива. При этом выбросы двигателей транспортных средств занимают первое место среди первичных источников загрязнения атмосферы.

Вместе с тем отработавшие газы являются распространенным и достаточно мощным источником вторичных энергоресурсов, с которыми отводится в окружающую среду от 25 до 35 % энергии сжигаемого в двигателе внутреннего сгорания (ДВС) ценного топлива. Применение на энергосиловых установках систем внешней утилизации теплоты отработавших газов сегодня рассматривается как один из основных путей снижения удельного расхода топлива и уменьшения загрязнения окружающей среды токсичными компонентами [1, 2]. При этом еще не созданы научные основы, необходимые для проектирования и изготовления высокоэффективных утилизационных теплообменников.

Поэтому прежде всего необходимо рассмотреть физические особенности и дать математическое описание процессов гидродинамики и теплообмена в охлаждаемых каналах утилизационных теплообменников, оптимизировать конструкцию утилизационного теплообменника по основным теплообменным, гидравлическим и акустическим характеристикам, установить взаимосвязь между основными термодинамическими параметрами газового потока и то влияние, которое они оказывают на эффективность и экологические показатели работы ДВС.

Как известно, применение глушителей в газорывном тракте позволяет уменьшить шум на выпуске на 30–40 дБ, однако одновременно повышается сопротивление потоку выхлопных газов – потери эффективной мощности ДВС могут достигать до 3–4 % [1, 2].

В связи с этим перед разработчиками глушителей стоит сложная задача: минимизировать потери, вызванные сопротивлением, обеспечивая при этом требуемое шумоглушение. Несмотря на значительное количество научных исследований в этой области техники [1, 2], в печати дается крайне ограниченная информация о конструктивных особенностях глушителей и путях достижения их оптимальных характеристик (ГОСТ 31 328–2006 (ИСО 14 163:1998) «Шум. Руководство по снижению шума глушителями»; пат. РФ 2 056 508 С1, МПК F01N1/08 «Глушитель шума двигателя внутреннего сгорания», авторы – В. Я. Груданов, С. В. Акуленко; пол. модель к пат. RU 171 331 U1, МПК F01N13/02, F01N1/06 «Реактивный глушитель шума», авторы – С. Г. Смирнов, В. А. Николаева, А. И. Комкин, А. И. Быков; [3–17]). При этом вопросы утилизации энергии отработавших газов большинством исследователей незаслуженно обойдены стороной. Поэтому создание эффективного глушителя с минимальным противодавлением и утилизацией энергии отработавших газов является актуальной задачей.

Таким образом, *цель настоящего исследования* – разработка научных основ проектирования глушителей шума двигателя внутреннего сгорания (ДВС) с утилизацией теплоты отработавших газов, обеспечивающих выпуск газовых потоков с улучшенными газодинамическими и акустическими характеристиками.

Процессы утилизации (отбора) энергии отработавших газов в выпускных трактах ДВС могут осуществляться с помощью утилизационных теплообменников самых разных конструкций: пластинчатых, трубчатых, змеевиковых, «греющих рубашек» и др. (пат. RU 2 243 388 С2, МПК F01N1/24 «Глушитель шума двигателя внутреннего сгорания», авторы – В. Л. Жданов, Э. Б. Куновский, А. П. Ракомсин, В. В. Корсаков, М. И. Горбачевич; а. с. 1 501 621 СССР: F 01 5/02 «Глушитель шума двигателя внутреннего сгорания», авторы – В. Я. Груданов, Н. И. Ширин, К. Н. Тупальский, Г. И. Белохвостов; «Транспортный утилизатор тепла отработавших газов», авторы – В. Я. Груданов, А. Н. Рубанов, Л. Т. Ткачева, А. В. Николаев, С. Л. Новодворский; [18–23]).

Данные процессы связаны прежде всего с внешним воздействием на газовый поток $q_{вн} (dq_{вн} < 0)$, с диссипацией части механической энергии и превращением ее в теплоту трения $(dq_{тр} > 0)$ и с возникновением в газовом потоке вследствие химических экзотермических реакций окисления оксидов азота NO_x внутреннего источника теплоты $q_{хим} (dq_{хим} > 0)$.

Для анализа таких процессов воспользуемся основными положениями теории Л. А. Вулиса [3] и будем рассматривать дозвуковой поток с числом Маха $M = 0,3-0,4 (M < 1)$ и внешним тепловым воздействием $dq_{вн} < 0$, то есть представим, что участок трубопровода ДВС с установленным в нем теплообменником работает в режиме комбинированного сопла и испытывает только тепловое воздействие, при этом техническая работа не совершается, проходное сечение трубы не изменяется по длине и расход газа остается постоянным, при этом будем полагать, что $|dq_{вн}| > (dq_{тр} + dq_{хим})$ или $(dq_{вн} + dq_{тр} + dq_{хим}) < 0$.

Термодинамический анализ процессов утилизации энергии отработавших газов.

Для термодинамического анализа выхлопного тракта ДВС с утилизацией теплоты реальный рабочий необратимый процесс в двигателе целесообразно заменить обратимым замкнутым циклом, совершаемым 1 кг двухатомного идеального газа, при условии, что количество подведенной теплоты в идеальном цикле соответствует теплоте, выделившейся при сгорании реального топлива в смеси с воздухом, а количество отведенной теплоты – теплоте при охлаждении отработавших газов после их выброса в атмосферу. Для утилизации теплоты отработавших газов можно использовать, например, теплообменник-змеевик, заполненный охлаждающей жидкостью (промежуточным теплоносителем) и установленный в полых резонансных камерах глушителя шума системы выпуска двигателя. Схема такой утилизационной системы показана на рис. 1.

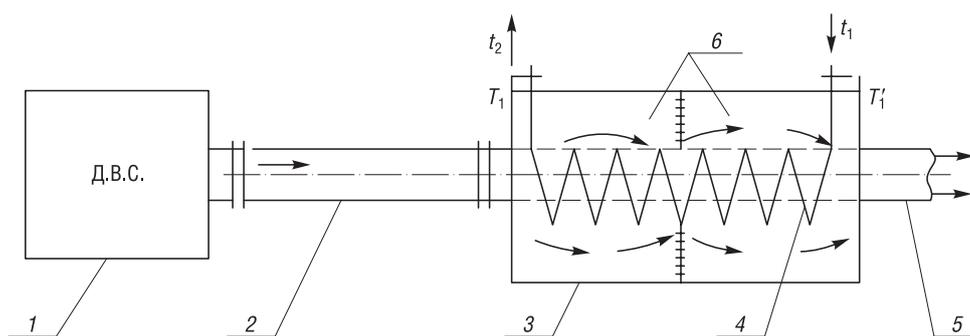


Рис. 1. Схема системы выпуска с утилизацией энергии отработавших газов ДВС в теплообменнике-змеевике с охлаждающей жидкостью: 1 – двигатель, 2 – приемная труба, 3 – глушитель шума, 4 – теплообменник-змеевик с охлаждающей жидкостью, 5 – выхлопная труба, 6 – резонансная камера

Fig. 1. Scheme of the exhaust system with the energy recovery of the exhaust gases of the internal combustion engine in a heat exchanger-coil with a coolant: 1 – engine, 2 – receiving pipe, 3 – noise suppressor, 4 – heat exchanger-coil with cooling liquid, 5 – exhaust pipe, 6 – resonant chamber

На рис. 2 приведена $T-S$ диаграмма заменяющего (идеального) обратимого цикла Отто с утилизацией теплоты отработавших газов.

Процессы 2–3 сгорания топлива и 4–1 выхлопа считаются как изохорные процессы подвода теплоты q_1 и отвода теплоты q_2 , а процесс отвода теплоты с утилизацией его в теплообменнике-змеевике – 4'–1'.

Тогда термический коэффициент полезного действия (КПД) цикла Отто:

1) без утилизации:

$$\eta_{1-2-3-4-1}^{Отто} = 1 - \frac{b + A}{a + b + c}, \quad (1)$$

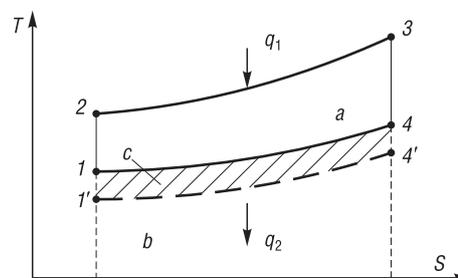


Рис. 2. $T-S$ диаграмма обратимого процесса цикла Отто с утилизацией теплоты отработавших газов

Fig. 2. $T-S$ diagram of the reversible process of the Otto cycle with exhaust gas heat recovery

2) с утилизацией:

$$\eta_{1-2-3-4'-1'}^{\text{Отто}} = 1 - \frac{b}{a + b + c}, \quad (2)$$

то есть

$$\eta_{1'-2-3-4'-1'}^{\text{Отто}} > \eta_{1-2-3-4-1}^{\text{Отто}}. \quad (3)$$

Однако для решения конкретных инженерных задач важно знать, насколько представляется возможным снизить температуру отработавших газов, каким при этом количеством теплоты можно располагать и достаточно ли ее будет для практической реализации заданного технологического процесса. В связи с этим необходимо рассмотреть эксергию теплоты отработавших газов ДВС с точки зрения возникающих в системе необратимых процессов.

Рассмотрим вопрос работоспособности нашей термодинамической системы, содержащей верхний (температура отработавших газов) T_1 и нижний T_2 источники теплоты и рабочее тело, при помощи которого совершается цикл и с которым подводится тепловой поток q . Если в качестве источника теплоты с температурой T_2 принять окружающую среду T_{cp} как элемент термодинамической системы (случай с обычным глушителем), то работоспособность можно вычислить через эксергию теплоты:

$$E = q \frac{T_1 - T_{\text{cp}}}{T_1}, \quad (4)$$

а ее уменьшение в результате необратимого падения температуры отработавших газов согласно теореме Гуи–Стодола можно представить как

$$E = E_1 - E_2 = T_{\text{cp}} \cdot \Delta S. \quad (5)$$

Тогда:

1) с утилизацией:

$$E_y = E_1 - E_2 = q \left(\frac{T_1 - T_{\text{cp}}}{T_1} \right) - q \left(\frac{T_1' - T_{\text{cp}}}{T_1'} \right), \quad (6)$$

где T_1 – температура газов в глушителе шума при их охлаждении, К; T_1' – температура промежуточного теплоносителя в теплообменнике-змеевике, К; q – тепловой поток, кДж/кг;

2) без утилизации $E_2 = 0$:

$$E_{6/y} = E_1 = q \left(\frac{T_1 - T_{\text{cp}}}{T_1} \right), \quad (7)$$

где T_1 – температура газов, проходящих по обычному глушителю, К.

Следовательно, с каждого 1 кг сжигаемого топлива в ДВС в случае утилизации энергии отработавших газов мы можем полезно использовать

$$E = E_{6/y} - E_y, \text{ кДж/кг}. \quad (8)$$

Эксергетический анализ теплообменных процессов в глушителе, таким образом, указывает на пути повышения его термодинамической эффективности. Так, применение теплообменника-змеевика в глушителе вызывает снижение температуры отработавших газов, что в свою очередь приводит к снижению потери эксергии по отношению к обычному глушителю. Если мощность двигателя ГАЗ-53 при номинальном числе оборотов коленчатого вала 2600 об/мин составляет по паспортным данным 85 кВт, то, применив установленный в глушителе шума теплообменник-змеевик, дополнительно из отбросной теплоты с отработавшими газами, согласно расчетам, можно полезно использовать 5–10 % энергии сжигаемого топлива. При этом температура отработавших газов снижается всего на 60–80 К.

На рис. 3. представлена диаграмма потоков эксергии теплоты рассмотренной термодинамической системы с утилизацией теплоты отработавших газов, построенная в соответствии с результатами проведенного анализа.

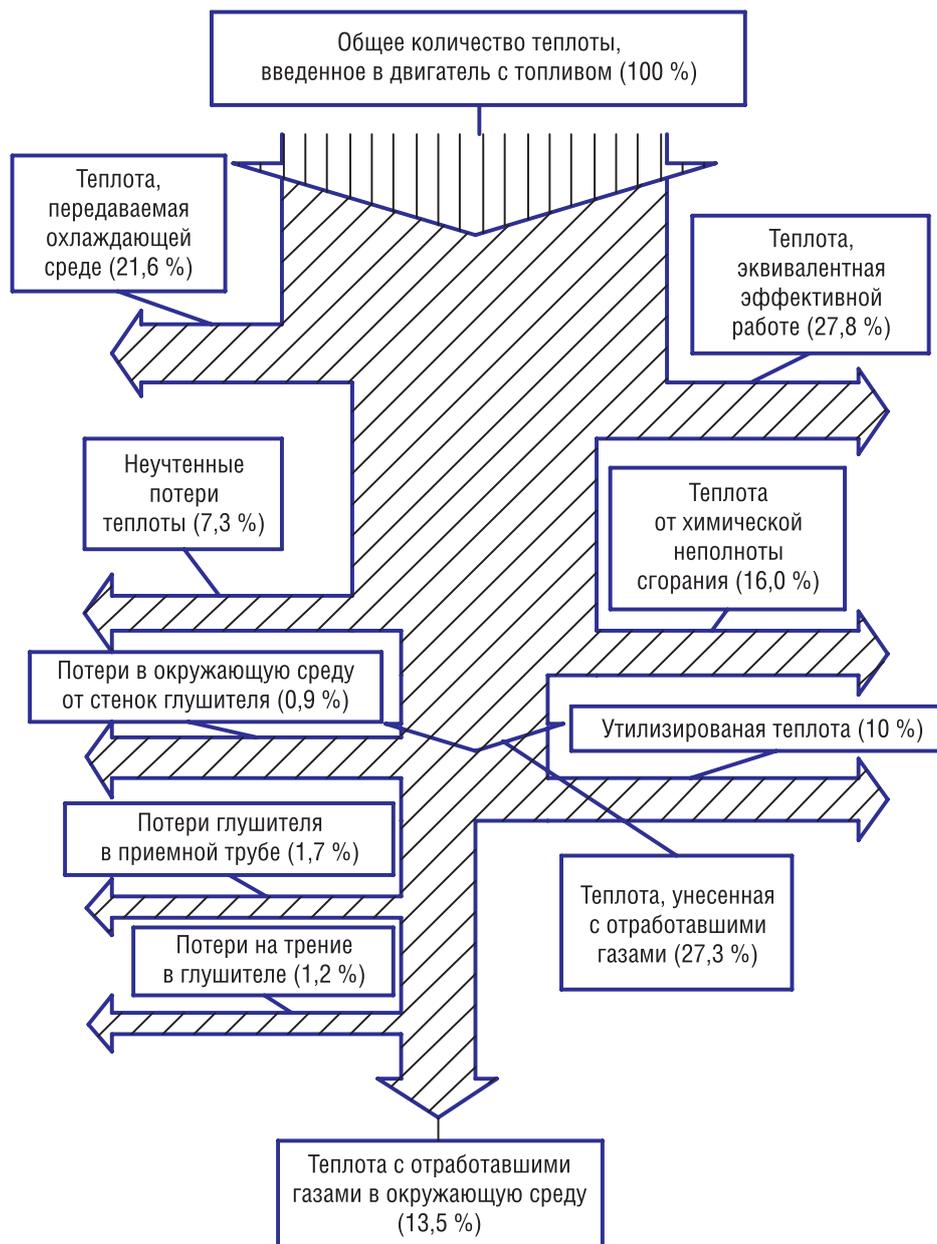


Рис. 3. Диаграмма потоков эксергии теплоты двигателя внутреннего сгорания автомобиля ГАЗ-53

Fig. 3. Diagram of heat exergy flows of the internal combustion engine of the GAZ-53 car

Таким образом, глушитель шума с установленным внутри теплообменником-змеевиком с позиции второго закона термодинамики, выраженного посредством эксергетического анализа, является более совершенной термодинамической системой по сравнению с обычным глушителем.

Математическое описание процессов утилизации в условиях внешнего теплового воздействия. Чтобы отразить физическую сущность рассматриваемых процессов и дать их математическое описание, примем, что работа глушителя шума с утилизацией энергии газов (с установленным внутри теплообменником) аналогична работе комбинированного сопла, в котором одновременно проявляются геометрические, расходные, механические и тепловые воздействия, а также работа сил трения.

Глушитель шума представляет собой трубу переменного сечения ($dF = \text{var}$), через которую проходит газ переменного массового расхода ($dG = \text{var}$), так как двигатель автомобиля постоянно работает в нестационарном режиме. В то же время движение газа по глушителю непостоянного сечения ($dF = \text{var}$) может сопровождаться совершенной механической работой, если установить,

например, турбину в одну из резонансных камер, то есть $dL_{\text{тех}} = \text{var}$. Одновременно в глушителях шума активно-реактивного типа в наибольшей степени проявляется явление диссипации энергии движения газа – процесса рассеивания части механической энергии и превращения ее в теплоту трения $dL_{\text{тр}}$. И, наконец, процесс утилизации энергии газов в глушителях шума характеризуется прежде всего отводом теплоты $dq_{\text{вн}}$, а также теплотой $dq_{\text{хим}}$, выделяемой при химических реакциях окисления окиси азота NO и двуокиси NO₂ и дальнейшей полимеризации NO₂ в четырехокись азота N₂O₄ (при достижении температуры газа ниже 420 К). Причем реакция превращения окиси азота осуществляется с выделением теплоты, то есть $dq_{\text{хим}} > 0$.

Таким образом, общая теплота, подводимая к потоку газа, складывается из отводимой наружу $q_{\text{вн}}$, теплоты трения $q_{\text{тр}}$ и теплоты химических реакций $q_{\text{хим}}$:

$$q = q_{\text{вн}} + q_{\text{тр}} + q_{\text{хим}}, \quad (9)$$

или

$$dq = dq_{\text{вн}} + dq_{\text{тр}} + dq_{\text{хим}}. \quad (10)$$

Тогда уравнение первого закона термодинамики для потока рабочего тела с утилизацией теплоты (охлаждением газа) примет вид:

$$dq = di + WdW + gdh + dL_{\text{тех}} + dL_{\text{тр}}. \quad (11)$$

Полагая, что $dL_{\text{тр}} = dq_{\text{тр}}$ и для горизонтально расположенных глушителей $dh = 0$ (где h – геометрическая высота),

$$dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}} = di + WdW + dL_{\text{тех}}. \quad (12)$$

Из общего уравнения энтропии имеем

$$dS = \frac{dq}{T}, \quad (13)$$

или

$$dS = \frac{dq_{\text{вн}} + dq_{\text{тр}} + dq_{\text{хим}}}{T}. \quad (14)$$

В то же время из уравнения Лапласа следует

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_s = -\frac{a^2}{V^2}, \quad (15)$$

где V – удельный объем.

Между тем из уравнения неразрывности

$$dV = V\left(\frac{dF}{F} + \frac{dW}{W}\right), \quad (16)$$

используя выражение

$$dP = \left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_s \left[dV - \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p \cdot \frac{TdS}{C_p} \right], \quad (17)$$

получаем следующую обобщенную зависимость, удобную для дальнейшего анализа:

$$VdP = -a^2 \left[\frac{dF}{F} + \frac{dW}{W} - \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p \frac{dq_{\text{вн}} + dq_{\text{тр}} + dq_{\text{хим}}}{C_p} \right]. \quad (18)$$

Далее используем известные уравнения, выражающие также первый закон термодинамики:

$$PdV = d(PV) + WdW + gdh + dL_{\text{тех}} + dL_{\text{тр}}. \quad (19)$$

Так как

$$d(PV) = PdV + VdP, \tag{20}$$

то

$$WdW = -VdP - gdh - dL_{\text{тех}} - dL_{\text{тр}}. \tag{21}$$

Исходя из того, что

$$Ma = \frac{W}{a}, \tag{22}$$

где a – местная скорость звука, подставим значение для VdP в уравнение (21):

$$\begin{aligned} (Ma^2 - 1) \frac{dW}{W} = \frac{dF}{F} - \frac{1}{VC_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dq_{\text{вн}} - \frac{1}{VC_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \cdot dq_{\text{тр}} - \frac{1}{VC_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dq_{\text{хим}} - \\ - \frac{1}{a^2} dL_{\text{тр}} - \frac{g}{a^2} dh - \frac{1}{a^2} dL_{\text{тех}}. \end{aligned} \tag{23}$$

Принимая, что $dq_{\text{тр}} = dL_{\text{тр}}$ и $dh = 0$, получаем:

$$(Ma^2 - 1) \frac{dW}{W} = \frac{dF}{F} - \frac{1}{VC_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p (dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}}) - \frac{1}{a^2} dL_{\text{тех}} - \left[\frac{1}{VC_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p + \frac{1}{a^2} \right] dL_{\text{тр}}. \tag{24}$$

Таким образом, мы аналитически получили уравнение, характеризующее изменение скорости газа в глушителе шума с утилизацией энергии с учетом всех вышеперечисленных факторов воздействия.

Рассмотрим полученное соотношение при условии, что $dF = 0$, $dL_{\text{тех}} = 0$, $dL_{\text{тр}} = 0$, но при наличии отвода теплоты (охлаждения газов):

$$(Ma^2 - 1) \frac{dW}{W} = - \frac{1}{VC_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p (dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}}). \tag{25}$$

При охлаждении газов $dq_{\text{вн}} < 0$, но одновременно $dq_{\text{хим}} > 0$. Отсюда рассмотрим два случая.

1. Если $(dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}}) < 0$.

Так как для газов всегда $C_p > 0$, $\left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p > 0$ и при дозвуковом потоке $Ma < 1$ (двигатели, как правило, работают при $Ma = 0,3 \div 0,4$), то интенсивное охлаждение газов $(dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}}) < 0$ приводит к торможению потока $dW < 0$, то есть газ в потоке сжимается и его скорость уменьшается.

2. Если $(dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}}) > 0$.

В этом случае имеет место подвод теплоты, что обуславливает ускорение потока $dW > 0$. Отсюда следует вывод, что при $dq_{\text{вн}} = dq_{\text{хим}}$ глушитель шума в данном случае не испытывает теплового воздействия, хотя газы охлаждаются и теплота отводится, но эта теплота эквивалентна теплоте, которая выделяется при химических реакциях окисления окиси азота NO в высшие окислы. При этом отметим, что при соответствующих температурах (ниже 1000 К) оксид азота (II) (окись азота) NO окисляется избыточным кислородом до диоксида азота (двуокиси азота) NO₂ по реакции



При дальнейшем охлаждении (473 К) начинается процесс полимеризации двуокиси азота в тетраоксид диазота (четыреокись азота) N₂O₄:

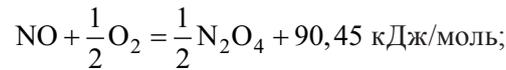


В смеси газов, состоящей из окиси азота NO и двуокиси азота NO₂, одновременно с четырехокисью азота N₂O₄ возможно образование и триоксида диазота (трехокиси азота) N₂O₃:

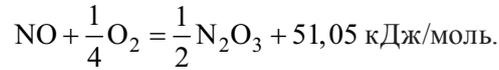


Таким образом, при пересчете на 1 моль оксида азота:

при окислении до N_2O_4 по пути (26), (27) эквивалентное уравнение реакции имеет вид



при окислении до N_2O_3 по пути (26), (28) эквивалентное уравнение реакции имеет вид



Соответственно, реакция окисления только 1 моля оксида азота происходит с выделением до 90,45 кДж теплоты. Значит, для достижения положительного эффекта теплового торможения газа и снижения при этом скорости, а следовательно, и уровня звукового давления необходимо, чтобы

$$dq_{\text{вн}} > dq_{\text{хим}}. \quad (29)$$

Установим также характер влияния теплового воздействия на изменение давления, температуры и плотности. При адиабатическом процессе уравнение состояния газа имеет вид

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^K, \quad (30)$$

где P , ρ – переменные давление и плотность газа соответственно; K – отношение теплоемкости при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме; P_0 , ρ_0 – постоянные давление и плотность соответственно [4].

Используя метод Л. А. Вулиса [3], получим следующие уравнения:

изменения давления:

$$(Ma^2 - 1) \frac{dP}{P} = KMa^2 \left(\frac{dG}{G} - \frac{dF}{F} \right) + \frac{1}{a^2} dL_{\text{тех}} + \frac{Ma}{a^2} (KMa - 1)(dq_{\text{вн}} - dq_{\text{хим}}), \quad (31)$$

при $dG = 0$, $dF = 0$, $dL_{\text{тех}} = 0$ и при $(dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}}) < 0$, $Ma < 1$ получаем, что $dP < 0$, то есть давление падает;

изменения температуры:

$$(Ma^2 - 1) \frac{dT}{T} = (K - 1)Ma^2 \left(\frac{dG}{G} - \frac{dF}{F} + \frac{K + 1}{a^2} dL_{\text{тех}} + \frac{K - 1}{a^2} (KMa^2 - 1)(dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}}) \right), \quad (32)$$

при $dG = 0$, $dF = 0$, $dL_{\text{тех}} = 0$, $Ma < 1$ и при $(dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}}) < 0$ получаем, что $dT < 0$, то есть температура уменьшается;

изменения плотности:

$$(Ma^2 - 1) \frac{d\rho}{\rho} = Ma^2 \left(\frac{dG}{G} - \frac{dF}{F} + \frac{1}{a^2} [dL_{\text{тех}} + (K - 1)(dq_{\text{вн}} - dq_{\text{хим}})] \right), \quad (33)$$

здесь при $dG = 0$, $dF = 0$, $dL_{\text{тех}} = 0$, $Ma < 1$ и при $(dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}}) < 0$ следует, что $d\rho > 0$, то есть плотность газа увеличивается.

В результате получается, что процессы утилизации энергии отработавших газов способствуют снижению температуры T , возрастанию плотности ρ , уменьшению скорости потока W и падению давления P , то есть имеет место эффект теплового торможения.

Снижение давления P и уменьшение скорости W при одновременном увеличении ρ приводит к меньшему противодавлению в системе выпуска двигателя и обуславливает тем самым повышение его КПД. Вместе с тем существенно снижается и уровень шума отработавших газов в системе выпуска.

Заключение. Отработавшие газы ДВС имеют значительные объемы, большие скорости движения газового потока с температурой 150–200 °С и в целом представляют собой достаточно мощный источник вторичных энергоресурсов, при этом отбор энергии от отработавших газов целесообразно осуществлять с помощью специальных утилизационных теплообменников-теплоутилизаторов, совмещенных конструктивно с серийным глушителем шума.

Термодинамический анализ процессов утилизации энергии отработавших газов подтвердил, что глушитель шума с установленным внутри теплообменником-змеевиком с позиции второго закона термодинамики, выраженного посредством эксергетического анализа, является более совершенной термодинамической системой по сравнению с обычным глушителем и имеет более высокий термический коэффициент полезного действия.

Математическое описание процессов утилизации в условиях внешнего теплового воздействия показало снижение температуры T , возрастание плотности ρ , уменьшение скорости потока W и падение давления P , что приводит к меньшему противодавлению в системе выпуска двигателя, повышению его КПД, снижению уровня шума выпуска, так как имеет место эффект теплового торможения потока газов – закон теплового торможения, открытого впервые теплофизиком Л. А. Вулисом в 1950 г. [3].

Получены аналитические уравнения для определения давления, температуры и плотности в условиях внешнего теплового воздействия, выведено уравнение первого закона термодинамики для потока рабочего тела с утилизацией теплоты, из которого следует, что общая теплота, подводимая к потоку газов, складывается из отводимой наружу $q_{\text{вн}}$, теплоты трения $q_{\text{тр}}$ и теплоты химических реакций $q_{\text{хим}}$:

$$q = q_{\text{вн}} + q_{\text{тр}} + q_{\text{хим}} \text{ или } dq = dq_{\text{вн}} + dq_{\text{тр}} + dq_{\text{хим}}. \quad (34)$$

Так как для газов всегда плотность $\rho > 0$, а $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p > 0$ и при дозвуковом потоке $Ma < 1$ (двигатель, как правило, работает при $Ma = 0,3-0,4$), то интенсивное охлаждение газов ($dq_{\text{вн}} + dq_{\text{хим}} < 0$), приводит к торможению потока $dW < 0$, то есть газ в потоке сжимается и его скорость уменьшается.

Утилизованную теплоту отработавших газов можно использовать, например, для обогрева помещений спецавтомобилей «Автомастерская», «Техпомощь», «Электролаборатория», «Автоматгазин», нагрева воды, подогрева продуктов питания и т. п.

Список использованных источников

1. Greenhouse gas emissions from heavyduty natural gas, hybrid, and conventional diesel on-road trucks during freight transport / D.C. Quiros [et al.] // Atmospheric Environment. – 2017. – Vol. 168. – P. 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.066>
2. Trubaev, P.A. Exergic analysis of technological heat devices / P.A. Trubaev, E.A. Zajtsev, P.V. Besedin // IJPT. – 2016. – Vol. 8, №4. – P. 24968–24975.
3. Вулис, Л. А. Термодинамика газовых потоков / Л. А. Вулис. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1950. – 304 с.
4. Инзель, Л. И. Основы глушения шума выхлопа двигателей внутреннего сгорания / Л. И. Инзель. – М.: Изд-во и 1-я тип. Машгиза в Лгд, 1949. – 196 с.
5. Шатров, М. Г. Шум автомобильных двигателей внутреннего сгорания / М. Г. Шатров, А. Л. Яковенко, Т. Ю. Кричевская. – М.: МАДИ, 2014. – 68 с.
6. Груданов, В. Я. Научно-практические подходы к совершенствованию конструкций глушителей шума поршневых двигателей внутреннего сгорания на основе теории чисел / В. Я. Груданов, Г. И. Белохвостов, Л. Т. Ткачева // Наука и техника. – 2021. – Т. 20, №5. – С. 434–444. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-434-444>
7. Груданов, В. Я. Моделирование и оптимизация гидравлических и акустических характеристик глушителей шума поршневых двигателей на основе теории чисел / В. Я. Груданов, Г. И. Белохвостов, Л. Т. Ткачева // Горная механика и машиностроение. – 2020. – №4. – С. 28–42.
8. Груданов, В. Я. Теория чисел в развитии машиностроительного комплекса Республики Беларусь / В. Я. Груданов, Е. Н. Филидович, Г. И. Белохвостов // Инженер-механик. – 2020. – Т. 86, №1. – С. 7–9.
9. Груданов, В. Я. Моделирование и оптимизация гидравлических и акустических характеристик глушителей шума поршневых двигателей / В. Я. Груданов, Л. Т. Ткачева // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – Т. 57, №4. – С. 17–28.
10. Иванов, Н. И. Борьба с шумом и вибрациями на путевых и строительных машинах / Н. И. Иванов. – М.: Транспорт, 1978. – 272 с.
11. Лубянченко, А. А. Улучшение виброакустических характеристик глушителей шума выпуска двигателей внутреннего сгорания большой мощности: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. А. Лубянченко; БалтГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова. – СПб., 2017. – 22 с.
12. Дробаха, М. Н. Снижение внешнего шума транспортных машин глушителями (на примере трактора МТЗ-82): дис. ... канд. техн. наук / М. Н. Дробаха. – СПб., 2004. – 148 л.
13. Разумовский, М. А. Борьба с шумом на тракторах / М. А. Разумовский. – Минск: Наука и техника, 1973. – 208 с.

14. Безручко А. Ф. Улучшение характеристик глушителей шума сельскохозяйственных тракторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Ф. Безручко. – Минск, 1989. – 15 с.
15. Комкин, А. И. Разработка современных методов расчета и проектирования автомобильных глушителей с требуемыми характеристиками: дис. ... д-ра техн. наук / А. И. Комкин; Балтийский госуд. техн. ун-т «Военмех» имени Д. Ф. Устинова. – СПб., 2012. – 48 с.
16. Быков А. И. Исследование акустических характеристик резонаторов Гельмгольца в системах снижения шума: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. И. Быков; БалтГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова. – СПб., 2021. – 22 с.
17. Белоцерковский, С. В. Автомобильные глушители: современные требования, тенденции развития, методы расчета и испытаний / С. В. Белоцерковский, В. Е. Тольский // Техн. акустика. – 2001. – № 1. – С. 30–37.
18. Груданов, В. Я. Утилизатор тепла отработавших газов / В. Я. Груданов, К. Н. Тупальский, А. Н. Рубанов. // Автомобильная промышленность. – 1986. – № 7. – С. 11–12.
19. Груданов, В. Я., Анализ и оценка математической модели процессов утилизации энергии отработавших газов / В. Я. Груданов, С. В. Жестков // Изв. вузов. Энергетика. – 1990. – № 9. – С. 13–16.
20. Груданов, В. Я. Математическое моделирование процессов утилизации энергии отработавших газов ДВС / В. Я. Груданов, Е. И. Широков // Двигателестроение. – 1990. – № 9. – С. 13–16.
21. Бабенко, В. А. Расчетное и экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена в охлаждаемых автомобильных глушителях шума / В. А. Бабенко, В. Я. Груданов // Проблемы тепло- и массообмена в процессах и аппаратах при использовании вторичных энергоресурсов и альтернативных источниках энергии: Междунар. шк.-семинар, сентябрь, 1990. – Минск: ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР, 1990. – С. 66–76.
22. Груданов, В. Я., Теплоотдача и гидравлическое сопротивление в процессах утилизации теплоты отработавших газов двигателей внутреннего сгорания / В. Я. Груданов, В. М. Осипов // Изв. вузов. Энергетика. – 1990. – № 3. – С. 81–84.
23. Груданов, В. Я. Физико-химические и теплообменные процессы в каталитических нейтрализаторах с утилизацией теплоты отработавших газов / В. Я. Груданов // Двигателестроение. – 1991. – № 1. – С. 47–49.

References

1. Quiros D. C., Smith J., Thiruvengadam A., Huai T. Greenhouse gas emissions from heavyduty natural gas, hybrid, and conventional diesel on-road trucks during freight transport. *Atmospheric Environment*, 2017, vol. 168, pp. 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.066>
2. Trubaev P. A., Zajtsev E. A., Besedin P. V. Exergic analysis of technological heat devices. *International Journal of Pharmacy and Technology*, 2016, vol. 8, no. 4, pp. 24968–24975.
3. Vulis L. A. *Thermodynamics of Gas Flows*. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1950. 304 p. (in Russian).
4. Inzel L. I. *Fundamentals of Muffling Exhaust Noise of Internal Combustion Engines*. Moscow, Publishing House and 1st Type. Mashgiza in Lgd, 1949. 196 p. (in Russian).
5. Shatrov M. G., Yakovenko A. L., Krichevskaya T. Yu. *Noise of Automobile Internal Combustion Engines*. Moscow, Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University, 2014. 68 p. (in Russian).
6. Grudanov V. Ya., Belokhvostov G. I., Tkacheva L. T. Scientific and practical approaches to improving the designs of noise dampers of piston internal combustion engines based on the theory of numbers. *Nauka i tekhnika = Science and Technique*, 2021, vol. 20, no. 5, pp. 434–444 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-434-444>
7. Grudanov V. Ya., Belokhvostov G. I., Tkacheva L. T. Modeling and optimization of hydraulic and acoustic characteristics of piston engine noise mufflers based on number theory. *Gornaya mekhanika i mashinostroenie = Mining Mechanical Engineering and Machine-Building*, 2020, no. 4, pp. 28–42 (in Russian).
8. Grudanov V. Ya., Filidovich E. N., Belokhvostov G. I. Number theory in the development of the machine-building complex of the Republic of Belarus. *Inzhener-mekhanik [Mechanical Engineer]*, 2020, vol. 86, no. 1, pp. 7–9 (in Russian).
9. Grudanov V. Ya., Tkacheva L. T. Modeling and optimization of hydraulic and acoustic characteristics of piston engine noise silencers. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta = The Belarusian-Russian University Herald*, 2017, vol. 57, no. 4, pp. 17–28 (in Russian).
10. Ivanov N. I. *The Fight Against Noise and Vibrations on Track and Construction Machines*. Moscow, Transport Publ., 1978. 272 p. (in Russian).
11. Lubyanchenko A. A. *Improvement of Vibroacoustic Characteristics of Noise Mufflers for the Release of High-Power Internal Combustion Engines*. St. Petersburg, 2017. 22 p. (in Russian).
12. Drobakha M. N. *Reduction of External Noise of Transport Vehicles with Silencers (on the Example of the MTZ-82 Tractor)*. St. Petersburg, 2004. 148 p. (in Russian).
13. Razumovskii M. A. *Noise Control on Tractors*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1973. 208 p. (in Russian).
14. Bezruchko A. F. *Improving the Characteristics of Noise Silencers of Agricultural Tractors*. Minsk, 1989. 15 p. (in Russian).
15. Komkin A. I. *Development of Modern Methods of Calculation and Design of Automobile Mufflers with the Required Characteristics*. St. Petersburg, 2012. 48 p. (in Russian).
16. Bykov A. I. *Investigation of Acoustic Characteristics of Helmholtz Resonators in Noise Reduction Systems*. St. Petersburg, 2021. 22 p. (in Russian).
17. Belotserkovsky S. V., Tolskyi V. E. The automobile mufflers: the modern requirements, tendencies of development, methods of calculations and tests. *Tekhnicheskaya akustika = Technical Acoustics*, 2001, no. 1, pp. 30–37 (in Russian).

18. Grudanov V. Ya., Tupal'sky K. N., Rubanov A. N. Exhaust gas heat utilizer. *Avtomobil'naya promyshlennost'* [Automotive Industry], 1986, no. 7, pp. 11–12 (in Russian).
19. Grudanov V. Ya., Zhestkov S. V. Analysis and evaluation of the mathematical model of the processes of waste gas energy utilization. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Energetika*. [News of Higher Educational Institutions. Energy], 1990, no. 9, pp. 13–16 (in Russian).
20. Grudanov V. Ya., Shirokov E. I. Mathematical modeling of the processes of utilization of the energy of exhaust gases of the internal combustion engine. *Dvigatelistroyeniye*, 1990, no. 9, pp. 13–16 (in Russian).
21. Babenko V. A., Grudanov V. Ya. Computational and experimental study of hydrodynamics and heat transfer in cooled automobile noise silencers. *Problemy teplo- i massoobmena v protsessakh i apparatakh pri ispol'zovanii vtorichnykh energoresursov i al'ternativnykh istochnikakh energii: Mezhdunarodnaya shkola-seminar, sentyabr', 1990* [Problems of Heat and Mass Transfer in Processes and Apparatuses Using Secondary Energy Resources and Alternative Energy Sources: International School-Seminar, September, 1990]. Minsk, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the Academy of Sciences of the BSSR, 1990, pp. 66–76 (in Russian).
22. Grudanov V. Ya., Osipov V. M. Heat transfer and hydraulic resistance in the processes of heat utilization of exhaust gases of internal combustion engines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Energetika* [News of Higher Educational Institutions. Energy], 1990, no. 3, pp. 81–84 (in Russian).
23. Grudanov V. Ya. Physico-chemical and heat exchange processes in catalytic converters with utilization of exhaust gas heat. *Dvigatelistroyeniye*, 1991, no. 1, pp. 47–49 (in Russian).

Информация об авторах

Груданов Владимир Яковлевич – доктор технических наук, профессор, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rektorat@bsatu.by

Ткачева Людмила Тимофеевна – кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rektorat@bsatu.by

Белохвостов Геннадий Иванович – кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: gbelohvostov@gmail.com

Бренч Марина Валерьевна – старший преподаватель, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rektorat@bsatu.by

Пинчук Анна Андреевна – аспирант, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rektorat@bsatu.by

Русских Виктор Владимирович – магистрант, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: viktrussk@yandex.by

Information about the authors

Vladimir Ya. Grudanov – D. Sc. (Engineering), Professor, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosty Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rektorat@bsatu.by

Ludmila T. Tkacheva – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosty Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rektorat@bsatu.by

Guennadi I. Belokhvostov – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosty Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gbelohvostov@gmail.com

Marina V. Brench – Senior Lecturer, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosty Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rektorat@bsatu.by

Anna A. Pinchuk – Graduate Student, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosty Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rektorat@bsatu.by

Viktor V. Russkikh – Master's Student, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosty Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: viktrussk@yandex.by

**Victor S. Popescu¹, Siarhei V. Vasilevich², Mihail M. Balan³, Cristian L. Malai¹,
Tatiana V. Balan¹, Onorin L. Volconovici¹**

¹State Agrarian University of Moldova, Chisinau, Republic of Moldova

²Belarusian State Aviation Academy, Minsk, Republic of Belarus

³Technical University of Moldova, Chisinau, Republic of Moldova

THE EFFICIENCY OF THE OILSEED DRYING PROCESS IN SUSPENDED LAYER

Abstract. The drying process of oilseeds in a suspended layer is investigated in order to increase productivity, reduce energy consumption and improve the quality of seeds for multipurpose use. To study the process of drying seeds of agricultural oilseeds, an experimental installation for drying seeds in a suspended layer has been developed, tested, optimized and implemented. The developed plant for drying seeds in a suspended layer is simple in design and easy to use, has high productivity. It also automates the process and has demonstrated a high level of operational safety during testing. To evaluate the effectiveness of the process of drying seeds in a suspended layer using the developed installation, three types of seeds of oilseed crops were selected: flax seeds, grapes and white sea buckthorn seeds. The results of the conducted studies of the drying process using the developed installation are: increasing the speed of the drying process; reducing the processing time; reducing energy consumption; reduction of processing costs; reduction of cost of processed products; improvement of the quality of processed products by increasing the degree of uniformity of drying and ensuring the preservation of the basic properties of seeds during heat treatment, mainly by reducing the degree of oxidation of vegetable fats in their components. Due to the rationalization of the drying process of oilseeds based on processing in a suspended layer, a number of tasks currently facing enterprises engaged in the primary processing of agricultural products have been solved. Using the results of the study will increase productivity, reduce energy consumption and processing costs, reduce the degree of oxidation of vegetable fats in the composition of seeds and improve their quality for subsequent use in the food industry, medicine, cosmetology, pharmaceuticals, etc.

Keywords: drying plant, seed treatment, suspended layer, process efficiency

For citation: Popescu V. S., Vasilevich S. V., Balan M. M., Malai C. L., Balan T. V., Volconovici O. L. The efficiency of the oilseed drying process in suspended layer. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 3, pp. 318–323 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-318-323>

В. С. Попеску¹, С. В. Василевич², М. М. Балан³, К. Л. Малай¹, Т. В. Балан¹, О. Л. Волконович¹

¹Государственный аграрный университет Молдовы, Кишинев, Республика Молдова

²Белорусская государственная академия авиации, Минск, Республика Беларусь

³Технический университет Молдовы, Кишинев, Республика Молдова

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА СУШКИ МАСЛИЧНЫХ СЕМЯН ВО ВЗВЕШЕННОМ СЛОЕ

Аннотация. Исследован процесс сушки масличных семян во взвешенном слое с целью повышения производительности, снижения энергозатрат и повышения качества семян для их многоцелевого использования. Для изучения процесса сушки семян сельскохозяйственных масличных культур разработана, испытана, оптимизирована и внедрена экспериментальная установка для сушки семян во взвешенном слое. Разработанная установка для сушки семян во взвешенном слое проста по конструкции и удобна в применении, имеет высокую производительность. Она также позволяет автоматизировать процесс и продемонстрировала высокий уровень эксплуатационной безопасности во время испытаний. Чтобы оценить эффективность процесса сушки семян во взвешенном слое с применением разработанной установки были отобраны три вида семян масличных сельскохозяйственных культур: семена льна, винограда и облепихи белой. Результатами проведенных исследований процесса сушки с использованием разработанной установки являются: увеличение скорости процесса сушки; сокращение времени технологической обработки; снижение энергопотребления; снижение затрат на переработку; снижение себестоимости продуктов переработки; повышение качества продуктов переработки за счет повышения степени равномерности сушки и обеспечения сохранения основных свойств семян в процессе термической обработки, главным образом при снижении степени окисления растительных жиров в их компонентах. За счет рационализации процесса сушки масличных семян, основанной на обработке во взвешенном слое, решен ряд задач, стоящих в настоящее время перед предприятиями, которые заняты первичной переработкой сельскохозяйственной продукции. Использование результатов исследования позволит повысить производительность, уменьшить потребление электроэнергии и затраты на переработку, снизить степень окисления растительных жиров в составе семян и повысить их качество для последующего применения в пищевой промышленности, медицине, косметологии, фармацевтике и т.д.

Ключевые слова: сушильная установка, обработка во взвешенном слое, эффективность процесса

Для цитирования: Эффективность процесса сушки масличных семян во взвешенном слое / В. С. Попеску [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, №3. – С. 318–323. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-318-323>

Introduction. Currently, the rise in energy prices makes it imperative to improve the efficiency of primary agro-food processing technologies. Efficient management of the agro-industrial complex can be ensured both by upgrading existing technologies and by developing and implementing new processing methods [1–3].

Thus, the effort of researchers in the field is particularly directed towards reducing electricity consumed and processing costs, increasing machine productivity and product quality [4–7].

Currently, one of the main problems of electrical seed drying technologies is the long process time and the essential consumption of electricity [8, 5–7, 9–11]. The given problem is exacerbated in the case of oilseed drying, which is rich in unstable vegetable fats in heat treatment processes [6–12]. Therefore, in order to identify solutions in this direction, a suspended layer seed drying plant was developed.

Research has confirmed that the application of the experimental plant, increases the speed of the process and reduces the duration of heat treatment, helping to ensure the quality of the seeds for subsequent use in the food industry, medicine, cosmetology, pharmaceuticals, etc. Moreover, the installation developed allows a reduction in electricity consumption and overall processing costs.

Material and method. The research was carried out on three types of oilseed: grape seed, linseed and white buckthorn seed. These types of seeds were selected for research because at present their drying is a problem, and they have a valuable potential for the industry of food, medicine, cosmetology, pharmaceuticals, etc.

The experimental installation for seed drying in a suspended layer, developed for the research, is shown in Figure 1. On the basis of this installation, the efficiency of the suspended bed drying process was estimated and the results were compared with those obtained by the classical dehydration method.

The suspended layer drying installation consists of the following components: on the casing 1 is mounted the wind tube and the control panel 3, which operates the inverter 2 and the fan 4. The fan draws in air at a flow rate of 430 m³/h through filter 11 and is operated by motor 13 model C 15/2 T with a power of 0.16 kW. The SHF generator 15 with drying chamber 14 is also mounted on the housing. The fan 4 is connected with the tube 6, to which the supply bank 5 is attached. The tube 6 vertically intersects the drying chamber 14, which is mounted on the support 8, and is fixed by the fixing-adjusting levers 12 to the guides 7. At the top of the tube 6 is mounted the product outlet pipe 9, and the perforated receiver 10.

The CPS-AM50 anemometer with ±1.5 % accuracy, TESTO 400 hot wire thermometer with ±1 % accuracy was used to measure air velocity, air flow and temperature.

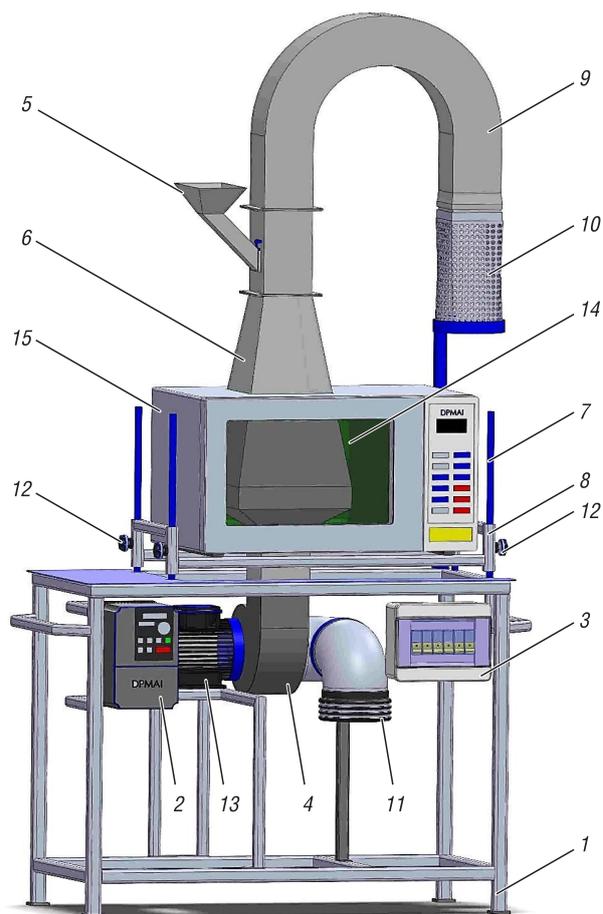


Figure 1. Experimental plant developed for seed drying: 1 – casing, 2 – inverter, 3 – control panel, 4 – fan, 5 – supply bank, 6 – tube aerodynamic, 7 – guides, 8 – support, 9 – product outlet pipe, 10 – perforated receiver, 11 – filter, 12 – fixing-adjusting levers, 13 – fan motor, 14 – treatment room, 15 – SHF generator

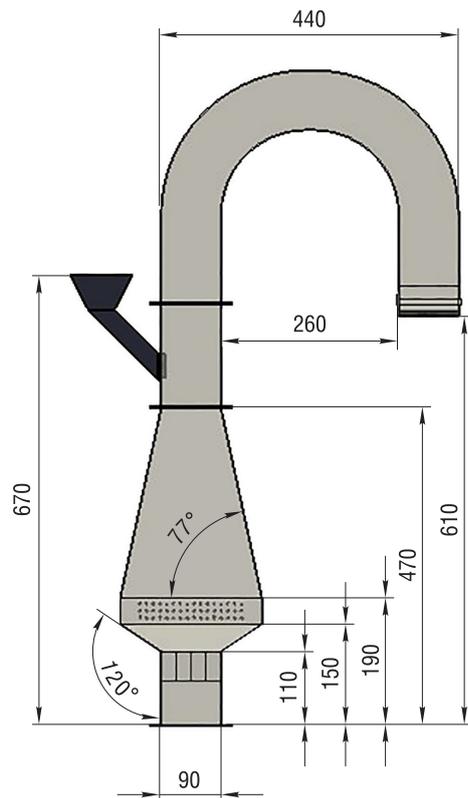


Figure 2. Aerodynamic tube

in the cross-sectional area of the tube from 0.0081 to 0.055 m². The suspended layer with seeds is maintained by air which has a flow rate of 430 m³/h and develops a velocity of 11.4 m/s, which is also the floating velocity of the seeds. The air pressure at the entrance to the tube is 98.7 kPa, and at the exit is 98.2 kPa. In the area of the suspended layer, a pressure value equal to 98.5 kPa was recorded.

The Reynolds number in the area of the suspended layer was measured and the value of 1905 was found, which is characteristic for the laminar air flow regime, positively influencing the stability of the suspended layer of seeds during the drying process.

As a result of the research on the drying process of the three types of oilseeds (grape seed, linseed and white buckthorn seed), the following was determined for each type in particular: speed of moisture reduction in the seeds, duration of the drying process and electricity consumption.

The results obtained by the suspended layer drying method were compared with those obtained by the classical drying method.

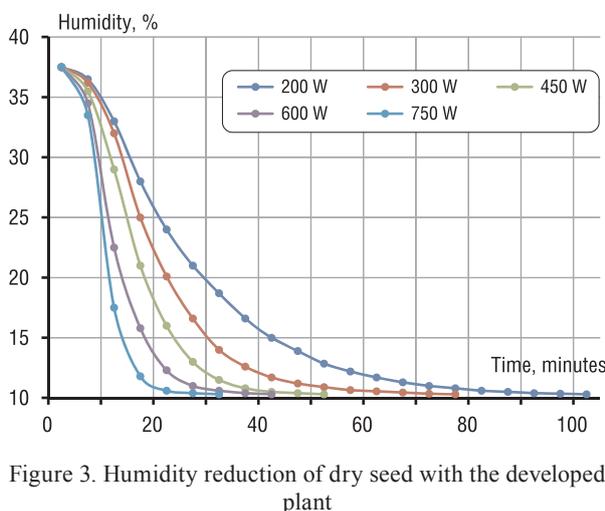


Figure 3. Humidity reduction of dry seed with the developed plant

The process of drying seeds in a suspended layer consists of the following stages:

Stage I consists of entraining the seeds in a suspended layer, which takes place in a tube (shown in figure 2), under the action of an air flow, which develops a speed of 11.4 m/s, with a flow rate of 430 m³/h.

In stage II, the heat treatment of the seeds trained in the suspended layer takes place for the different regimes examined.

At stage III, the self-separation of the seeds from the suspended layer begins. The separation starts for the first seeds with the lowest mass and moisture concentration, after which they are followed by the rest of the seeds depending on the mass and moisture content for each individual seed, and until the end of the process, all the seeds with more mass and with higher moisture content are separated high.

Results and discussions. During the investigations it was observed that in order for the grape seeds to be kept in the suspended layer, it is necessary that the air speed in the aerodynamic tube be equal to their floating speed. Analyzing the aerodynamic properties of the grape seeds, it was observed that the speed of the air current in the tube is higher towards the central axis of the tube and lower towards the periphery.

The suspended seed layer is formed at a height from the base of the tube equal to 110 mm, where there is an increase in the cross-sectional area of the tube from 0.0081 to 0.055 m². The suspended layer with seeds is maintained by air which has a flow rate of 430 m³/h and develops a velocity of 11.4 m/s, which is also the floating velocity of the seeds. The air pressure at the entrance to the tube is 98.7 kPa, and at the exit is 98.2 kPa. In the area of the suspended layer, a pressure value equal to 98.5 kPa was recorded.

Figure 3 shows, as an example, the humidity reduction for drying grape seeds in a suspended layer with the developed plant application.

Using the suspended layer treatment method, the seeds were dried to the optimum moisture level of 10.3 % and as a result of examining 5 treatment regimens: 200 W, 300, 450, 600, 750 W, the duration of treatment for each regime was determined, respectively: 103 minutes, 76, 53, 43, 33 minutes.

Following the seed drying process, the kinetics of the process was determined and the results obtained from the suspended layer drying method were compared with those obtained by the classical drying method.

Table shows, as an example, the comparison of the results obtained for drying by the methods analyzed, for grape seeds, for a treatment source power of 450 W.

Analyzing the results of drying with SHF application, we observe that the drying time is 41 minutes shorter for the suspended layer than for the classical drying method. Also the drying speed, with the application of SHF in a suspended layer, is 0.35 %/minute higher than with the application of SHF by the classical method.

The results confirm that, even when drying these seeds by convection in a suspended layer, the drying time is 61 minutes shorter than when drying by convection using the classical method. The speed of convection drying in the suspended layer is also 0.26 %/minute higher than in the classical drying method.

It was found that when drying these seeds in a suspended layer with the application of SHF, electricity consumption is lower than when drying with SHF by the classical method by 0.32 kWh.

Also, for convection drying in a suspended layer, the electricity consumption is lower than for convection drying by the classical method by 0.46 kWh.

Comparing both drying methods, based on the applied treatment source, it is recommended to use the suspended bed drying with SHF application. This method is characterized by increased drying speed and reduced drying time for all three types of seeds examined: grape seed, linseed and white buckthorn seed.

For quality analysis, dried seeds were analysed microscopically. Figure 4 shows, as an example, the microscopic analysis of grape seeds, which were dried by the classical method.

From this figure it can be seen that micro cracks have formed on the surface of seeds dried by the classical method.

This is because in this method, in the drying process, the seeds are subjected to mechanical action, which causes cracks to appear on their surface. These micro-cracks negatively influence the stability of the seeds in the drying process and reduce quality. This is explained by the fact that the vegetable fats in the seed are more sensitive to contact with oxygen in the air. Thus, through cracks in the conventional drying process, oxidation of the fats occurs and the quality of conventionally dried seed is reduced.

Figure 5 shows the microscopic analysis of the seeds, which were dried in a suspended layer.

Seed drying results by methods examined

Treatment source applied to drying	Drying process parameters	Drying method	
		Classical drying method	The suspended layer drying method
Convection	Drying speed, %/minute	0,72	0,98
	Drying time, minutes	244	183
	Electricity consumption, kWh	1,83	1,37
SHF	Drying speed, %/minute	1,42	1,77
	Drying time, minutes	94	53
	Electricity consumption, kWh	0,71	0,39

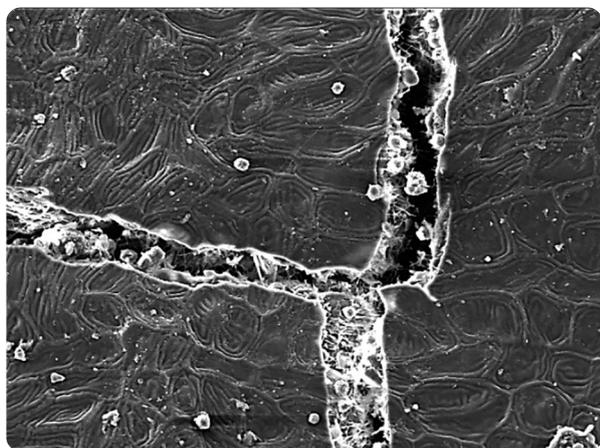


Figure 4. Microscopic analysis of dried seeds by the classical method

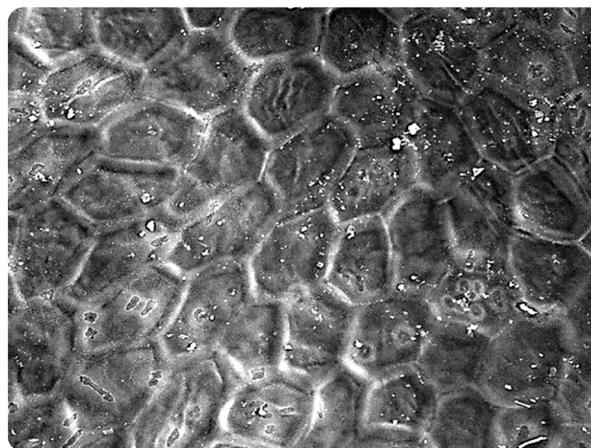


Figure 5. Microscopic analysis of dried seeds in suspended layer

It can be seen that no micro cracks have formed on the surface of the dried seed in the suspended layer. This is due to the fact that, by this method, the seeds are not subjected to negative mechanical actions, as by the classical method, and this fact prevents the appearance of cracks or other defects on their surface. The suspended layer drying method therefore excludes the appearance of micro cracks and prevents oxidation of the vegetable oil in the seeds.

Thus, the results of the research confirmed that the application of the experimental installation significantly increases the speed of the drying process and reduces the heat treatment time, contributing to the increase of the process productivity.

Moreover, electricity consumption is significantly reduced in the application of the suspended layer drying compared to the classical method, and these are the basic technological parameters for a drying process with low electricity costs and high productivity.

Research has shown that the seeds are not subjected to mechanical action during the drying process and the risk of cracks on the seed surface or other defects is absolutely excluded. The risk of oxidation of the vegetable fats in the oilseed content, which can occur through these cracks when in contact with oxygen, is therefore also excluded. This is quite important for the preservation of the quality of seeds rich in vegetable oils for further use in the food industry, medicine, cosmetology, pharmaceuticals, etc.

Conclusions

1. The installation developed for the drying of seeds in a suspended layer allows increasing the speed of the drying process, reducing the duration of the process and the consumption of electricity for all three types of seeds examined: grape seeds, linseed and white hawthorn seeds.

2. The drying in suspended layer does not allow defects to appear in the drying process of the seeds and ensures the preservation of their quality for further use in the food industry, medicine, cosmetology, pharmaceuticals, etc.

References

1. Silva-Espinoza M., Ayed C., Foster T., et al. The Impact of Freeze-Drying Conditions on the Physico-Chemical Properties and Bioactive Compounds of a Freeze-Dried Orange Puree. *Foods*, 2019, vol. 9, no. 1, p. 32. <https://doi.org/10.3390/foods9010032>
2. Popescu V., Malai L., Rotari V., Voloconovici O. Reliable system for processing agricultural products. *National Interagency Scientific and Technical Collection of Works – Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines*. Kropyvnytskyi, 2019, issue 49, pp. 200–205. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2019.49.200-205>
3. Popescu V., Malai L. Estimarea parametrilor sistemului fiabil pentru prelucrarea produselor agricole. *Știința agricolă, UASM, Chișinău*, 2019, no. 2, pp. 109–113.
4. Chou S., Chua, K. New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, vol. 12, pp. 359–369. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(01\)00102-9](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(01)00102-9)
5. Altemimi A., Aziz S., Al-Hilphy A., et al Critical review of radio-frequency (RF) heating applications in food processing. *Food Quality and Safety*, 2019, vol. 3, no. 2, pp. 81–91. <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyz002>
6. Nowicka P., Wojduła A., Lech K., Figel A. Chemical Composition, Antioxidant Capacity, and Sensory Quality of Dried Sour Cherry Fruits pre-Dehydrated in Fruit Concentrates. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, vol. 10, no. 8, pp. 2076–2095. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1561-5>
7. Aktaş M., Khanlari A., Amini A., et al. Performance analysis of heat pump and infrared–heat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology. *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 132, pp. 327–338. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.027>
8. Sehrawat R., Nema P., Kaur B. Quality evaluation and drying characteristics of mango cubes dried using low-pressure superheated steam, vacuum and hot air drying methods. *LWT*, 2018, vol. 92, pp. 548–555. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.03.012.5>
9. Zhang R., Hoffmann T., Tsotsas E. Novel Technique for Coating of Fine Particles Using Fluidized Bed and Aerosol Atomizer. *Processes*, 2020, vol. 8, no. 12, p. 1525. <https://doi.org/10.3390/pr8121525>
10. Sochorová L., Prusova B., Jurikova T., Miček J., Adámková A., Baroň M., Sochor J. The Study of Antioxidant Components in Grape Seeds. *Molecules*, 2020, vol. 25, no. 16, art. no. 16. <https://doi.org/10.3390/molecules25163736>
11. Nedeff V., Mosnegutu E., Panainte M., Carment S. Researches concerning the Aerodynamic Sorting of Solid Particles According to the Surface States. *Revista de Chimie*, 2018, vol. 59, pp. 360–365. <https://doi.org/10.37358/RC.08.3.1763>
12. Babu A., Kumaresan G., Raj A., et al. Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 90, pp. 536–556. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.002>

Information about the authors

Victor S. Popescu – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, State Agrarian University of Moldova, Chisinau, Republic of Moldova (56, str. Mircești, MD 2049, Chisinau, Republic of Moldova). E-mail: vspopescu@mail.ru

Siarhei V. Vasilevich – Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory, Belarusian State Aviation Academy (77, Uborevich Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: svasilevich@yandex.ru

Mihail M. Balan – Ph. D. Student, Technical University of Moldova (9/8, str. Studenților, MD 2049, Chisinau, Republic of Moldova). E-mail: balanmihail.utm@mail.ru

Cristian L. Malai – Ph. D. Student, State Agrarian University of Moldova (56, str. Mircești, MD 2049, Chisinau, Republic of Moldova). E-mail: onorin7@gmail.com

Tatiana V. Balan – Ph. D. Student, State Agrarian University of Moldova (9/8, str. Studenților, MD 2049, Chisinau, Republic of Moldova). E-mail: balan.tatiana98@mail.ru

Onorin L. Volconovici – Ph. D. Student, State Agrarian University of Moldova (56, str. Mircești, MD 2049, Chisinau, Republic of Moldova). E-mail: onorin.volconovici@gmail.com

Информация об авторах

Попеску Виктор Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, Государственный аграрный университет Молдовы (ул. Мирчешти, 56, MD 2049, Кишинев, Республика Молдова). E-mail: vspopescu@mail.ru

Василевич Сергей Владимирович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Белорусская государственная академия авиации (ул. Уборевича, 77, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: svasilevich@yandex.ru

Балан Михаил Михайлович – аспирант, Технический университет Молдовы (ул. Студенцилор 9/8, MD 2049, Кишинев, Республика Молдова). E-mail: balanmihail.utm@mail.ru

Малай Кристиан Леонидович – аспирант, Государственный аграрный университет Молдовы (ул. Мирчешти, 56, MD 2049, Кишинев, Республика Молдова). E-mail: onorin7@gmail.com

Балан Татьяна Викторовна – аспирант, Технический университет Молдовы (ул. Студенцилор 9/8, MD 2049, Кишинев, Республика Молдова). E-mail: balan.tatiana98@mail.ru

Волконовичи Онорин Львович – аспирант, Государственный аграрный университет Молдовы (ул. Мирчешти, 56, MD 2049, Кишинев, Республика Молдова). E-mail: onorin.volconovici@gmail.com

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ
DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

УДК 615.478.1

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-324-331>

Поступила в редакцию 19.04.2022

Received 19.04.2022

Д. И. Козловский

*Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии имени
Н. Н. Александрова, аг. Лесной, Минский район, Минская область, Республика Беларусь*

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ПРОВЕДЕНИИ БРАХИТЕРАПИИ**

Аннотация. Представлен метод оценки точности позиционирования источника с использованием нового фантома для проведения процедур контроля качества аппликаторов в брахитерапии. Приведено описание фантома для проведения измерения в рамках процедур контроля качества аппликаторов для брахитерапии, которые в виде стержня размещаются в фантоме на расстоянии 2–4 см от места расположения ионизационной камеры. Проведены измерения мощности воздушной кермы от источника и расчет расстояния от источника до ионизационной камеры. Выполнено сравнение измеренных значений расстояний со значениями, полученными при измерении по рентгеновским изображениям аппликатора с расположенным в нем источником либо рентгеноконтрастными маркерами. Зафиксированные при помощи разработанного фантома параметры хорошо согласуются с показателями, полученными при использовании установленного в процедурном помещении рентгеновского аппарата ($p > 0,05$). Применение предложенного фантома позволит не только определить точность установки источника излучения в позиции пребывания в канале аппликатора, но и проводить верификацию планов облучения для различных типов аппликаторов, в том числе с использованием экранирующих блоков.

Ключевые слова: брахитерапия, контроль качества, фантом, аппликатор, позиционирование источника

Для цитирования: Козловский, Д. И. Методы оценки точности позиционирования источника излучения при проведении брахитерапии / Д. И. Козловский // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, № 3. – С. 324–331. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-324-331>

Dzianis I. Kazlouski

N. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus, agro-town Lesnoy, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus

METHOD FOR ASSESSING THE ACCURACY OF SOURCE POSITIONING DURING BRACHYTHERAPY

Abstract. A method for assessing the accuracy of source positioning using a new phantom for quality control procedures of applicators in brachytherapy is presented. A description is given of a phantom for performing measurements as part of quality control procedures for brachytherapy applicators, which are placed in the phantom in the form of a rod at a distance of 2–4 cm from the location of the ionization chamber. The air kerma strength was measured and the distance from the source to the ionization chamber was calculated. The measured values of the distances were compared with the values obtained by measuring the X-ray images of the applicator with a source located in it or radiopaque markers. The parameters recorded using the developed phantom are in good agreement with the parameters obtained using the X-ray machine installed in the procedural room ($p > 0.05$). The use of the proposed phantom will allow not only determination of the accuracy of the radiation source position in the applicator channel, but also verification of the irradiation plans for various types of applicators, including the use of shielding blocks.

Keywords: brachytherapy, quality control, phantom, applicator, source positioning

For citation: Kazlouski D. I. Method for assessing the accuracy of source positioning during brachytherapy. *Vesiti Natsyyanal' - nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 3, pp. 324–331 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-324-331>

Введение и постановка задачи. Брахитерапия является важной частью лучевой терапии и часто используется в комбинации с дистанционной лучевой терапией. Применение брахитерапии обусловлено необходимостью подведения высоких доз облучения на небольшие, хорошо локализованные опухоли либо, при необходимости, снижения суммарной поглощенной дозы на здоровые органы и ткани. Однако этот метод, в сравнении с дистанционной лучевой терапией, подвержен большому количеству неопределенностей [1]. В таком случае точность доставки дозы методом высокодозной брахитерапии является важным аспектом для достижения успешного результата в большей степени из-за малых объемов воздействия и больших градиентов доз. По данным Международной комиссии по радиологической защите, большинства ошибок, зарегистрированных к 2004 г., можно было бы избежать, если бы персонал имел надлежащее оборудование для мониторинга [2].

Использование различных типов аппликаторов для доставки дозы требует проведения процедур контроля качества перед началом их клинического использования для определения соответствия техническим характеристикам аппликатора заявленных размеров и формы канала для движения источника. Ввод аппликаторов в клиническую эксплуатацию как часть программы гарантии качества в лучевой терапии включает в себя проверку дозиметрических и геометрических параметров аппликаторов [3, 4]. Широкое применение аппликаторов индивидуального изготовления для максимального соответствия условий облучения форме и размерам мишени требует тщательной проверки соответствия дозиметрического плана облучения реальным клиническим условиям непосредственно перед каждым сеансом лечения. Геометрия аппликатора или исходные положения источника в канале аппликатора могут быть сохранены в виде файлов библиотеки и позже использоваться в клинических условиях. Важно понимать, что даже реконструированный как следует аппликатор, но при этом неправильно расположенный на трехмерной серии изображений на этапе дозиметрического планирования, не сможет дать верную оценку распределения дозы [5].

Для определения параметров аппликаторов используются рентгеновские пленки, а также цифровые EPID-панели [6, 7]. Хотя измерения с помощью пленки довольно точные, время, необходимое для выполнения нескольких измерений, может быть значительным, поскольку новую пленку необходимо размещать перед каждым экспериментом. Это увеличивает неопределенность позиционирования из-за размещения пленок на держателе и выравнивания аппликатора поверх них [8, 9]. Рентгеновский аппарат с цифровой панелью получения изображений позволяет проводить большое количество измерений за короткий промежуток времени. В то же время значительно повышается точность определения позиции источника, а также возможность моделирования аппликатора в системе планирования лечения, что допускает проведение измерений в трех проекциях и определение соответствия между позициями остановки источника и методами реконструкции аппликатора. В отчете рабочей группы Европейского общества радиационных онкологов, который включает обзор литературы, описываются преимущества отслеживания источника и измерения времени пребывания, а также определяются некоторые требования и будущие направления для дозиметрии *in vivo* в брахитерапии [10].

В данной работе представлено и исследовано устройство, которое предназначено для проведения процедур контроля качества аппликаторов при вводе их в клиническую эксплуатацию. *Основная цель работы* – исследовать метод использования представленного устройства на основе цилиндрического типа аппликаторов, провести измерения в рамках процедур контроля качества аппликаторов с применением данного фантома.

Устройства для проведения контроля качества в брахитерапии. Для минимизации влияния погрешностей расположения источника при проведении дозиметрического планирования лечения и доставке дозы на аппарате брахитерапии проводится контроль качества аппликаторов при вводе их в клиническую эксплуатацию и периодически в процессе использования. Применение аппликаторов индивидуального изготовления позволяет повысить качество лучевой терапии, так как в этом случае радиационное воздействие проводится более эффективно в соответствии с требуемыми условиями. При этом необходимо обратить особое внимание на использование процедур контроля качества перед каждым клиническим применением аппликатора, особенно тогда, когда возможно изменение положения катетеров после аппликации. Проверки систем дозиметрического планирования облучения, которые предназначены для определения качества доступных методов реконструкции, не позволяют в полной мере оценить

точность расположения источника излучения в аппликаторе. Некоторые факторы, такие как кривизна канала для движения источника, точность и воспроизводимость положения источника, путь движения источника к активной позиции и прочие, обуславливают точность положения источника в аппликаторе и, как следствие, точность доставки дозы на аппарате.

Существуют фантомы для определения точности проведения реконструкции аппликатора, то есть определения позиции источников в аппликаторе при дозиметрическом планировании. Например, трехмерный матричный фантом (Baltas Phantom) представляет собой сплошное высокоточное устройство, используемое совместно с аппаратом рентгеновской визуализации для брахитерапии [11]. Фантом состоит из шести пластин из полиметилметакрилата толщиной 20 мм, длиной 120 мм и шириной 120 мм, между которыми вставлены по пять сферических рентгеноконтрастных маркеров (25 в общей сложности). В центральную пластину встроен дополнительный маркер для идентификации положения и ориентации фантома. Данный фантом позволяет проверить только точность реконструкции катетеров для системы дозиметрического планирования.

Существующие в настоящее время системы дозиметрического контроля *in vivo* в брахитерапии не позволяют точно оценить погрешность подведения дозы, а также возможные отклонения в позиционировании источника или аппликатора целиком [12]. Это связано с существенным удалением детектора от излучающей системы, размерами детекторов и точностью их регистрации на полученных изображениях. Даже незначительные отклонения в определении позиции детекторов, в том числе и взаимное смещение излучающей и регистрирующей систем в промежутке между получением изображений и доставкой дозы, не дают возможности оценить влияние неопределенностей позиционирования источника в аппликаторе.

Материалы и методы. Для определения позиции остановки источника нами был предложен фантом (рис. 1), который состоит из квадратной емкости, имеющей длину и ширину стенок по 300 мм, толщину 10 мм. Квадратная емкость выполнена из полиметилметакрилата (ПММА) и снабжена тремя ножками с возможностью регулировки фантома по высоте. Для удобства перемещения фантома квадратная емкость снабжена двумя ручьями, расположенными снаружи



Рис. 1. Внешний вид фантома: 1 – квадратная емкость, 2 – регулируемые ножки (три ножки), 3 – ручки для переноса фантома (две ручки), 4 – устройство для позиционирования ионизационной камеры, 5 – цилиндр, 6 – основа с зажимом, 7 – ручка для фиксации на цилиндре, 8 – вращающий фиксатор аппликатора

Fig. 1. Appearance of the phantom: 1 – square container, 2 – adjustable legs (three legs), 3 – handles for carrying the phantom (two handles), 4 – device for positioning the ionization chamber, 5 – cylinder, 6 – base with clip, 7 – handle for fixing on the cylinder, 8 – rotating applicator lock

по центру противоположащих сторон. Внутри квадратной емкости по центру параллельно двум рукояткам между противоположащими стенками фантома закреплено устройство для позиционирования ионизационной камеры объемом 600 мм^3 типа Farmer, которое представляет собой цилиндр из ПММА диаметром 15 мм для расположения ионизационной камеры в центре фантома. На расстоянии 40 мм от боковой стенки и 30 мм сверху от края стенки закреплено устройство для фиксации аппликатора. Устройство для фиксации аппликатора содержит цилиндр диаметром 20 мм и длиной 60 мм, на котором свободно перемещается основа с зажимом высотой 50 мм, длиной 20 мм и шириной 15 мм. Основа с зажимом снабжена рукояткой для фиксации на цилиндре и вращающим фиксатором аппликатора на ее конце. Квадратную емкость (фантом) наполняют водой до отметки «Full» (40 мм от верхней границы стенки фантома).

Фантом был установлен в процедурном помещении на стол, где размещается аппарат для проведения брахитерапии. Стол расположен в центре помещения на расстоянии не менее 1 м от пола, стен или массивных предметов. Квадратную емкость (фантом) наполнили водой до отметки «Full». Ионизационную камеру разместили в устройстве для ее позиционирования и подключили к электрометру, расположенному в комнате управления. Аппликатор для брахитерапии при помощи устройства фиксации аппликатора расположили таким образом, чтобы исследуемая позиция остановки источника при измерении оказалась на расстоянии 20–40 мм от места расположения ионизационной камеры. Данное расстояние обусловлено расположением области интереса при проведении расчетов для брахитерапии. При этом позиция для измерения выбиралась в точке аппликатора, расположенной на минимальном удалении от ионизационной камеры. Позиция для измерения выбиралась следующим образом: источник располагался в аппликаторе последовательно в каждой позиции, при этом позиция для измерения выбиралась по наибольшему значению показания дозиметра.

Источник излучения помещался в аппликатор в позицию для измерения. Измерения заряда на ионизационной камере при помощи электрометра проводились в течение 1 мин последовательно 4 раза, за измеренное значение принималось среднее арифметическое значение полученных измерений. Расстояние от источника излучения до ионизационной камеры (d , м) было рассчитано по формуле

$$d = \sqrt{\frac{\dot{K}_{\text{ref}} \cdot t}{M_{\text{uncor}} \cdot N_k \cdot p_t \cdot p_p \cdot p_{\text{hum}} \cdot p_{\text{pol}} \cdot p_{\text{ion}} \cdot f_{\text{sc}} \cdot f_{\text{geo}} \cdot p_w}}, \quad (1)$$

где t – время измерений, ч; \dot{K}_{ref} – мощность воздушной кермы, записанная в консоль управления аппаратом на основании калибровки источника, с учетом радиоактивного распада изотопа, $\text{Гр} \cdot \text{м}^2/\text{ч}$; M_{uncor} – некорректируемое показание дозиметра (среднее арифметическое из четырех измерений), Кл; N_k – калибровочный коэффициент ионизационной камеры для гамма-спектра соответствующего изотопа, определенный в единицах воздушной кермы, $\text{Гр}/\text{Кл}$; p_t – поправочный коэффициент на отклонение температуры от стандартных условий при измерении; p_p – поправочный коэффициент на отклонение атмосферного давления от стандартных условий при измерении; p_{hum} – поправочный коэффициент на отклонение относительной влажности от стандартных условий при измерении; p_{pol} – поправочный коэффициент на эффект рекомбинации ионов при измерениях; p_{ion} – поправочный коэффициент на эффект поляризации при измерениях; f_{sc} – поправочный коэффициент, учитывающий разницу в величине рассеянного излучения для полно-рассеивающего фантома и фантома, в котором проводят измерения; f_{geo} – поправочный коэффициент, учитывающий поглощение и рассеяние в воде; p_w – поправочный коэффициент на поглощение и рассеяние в стенке камеры и колпачке во время калибровки.

Не меняя положения аппликатора и ионизационной камеры, фантом разместили на столе рентгеновского изоцентрического аппарата Integrated Brachytherapy Unit (IBU) производства Elekta (Швеция). В аппликатор установили рентгеноконтрастный маркер. Были получены два рентгеновских изображения под углом 45° и 315° (разность – 90°) для минимизации влияния погрешности реконструкции изображений. Полученные рентгеновские снимки загрузили в систему планирования облучения Oncentra Brachy V.4.5.2. При помощи метода реконструкции по описательным точкам (рентгеноконтрастные маркеры) было определено планируемое положение источника при измерениях, после чего измерено расстояние между центром ионизационной камеры и полученной активной позицией, которая соответствует позиции источника во время

измерений. Далее аппликатор подключили к аппарату для проведения лечения. Источник излучения был расположен в позиции для проведения измерений, определенной ранее для вычисления расстояния до ионизационной камеры. При помощи аппарата IBU получили рентгеновские изображения аппликатора с источником, по которым в системе планирования облучения провели измерение расстояния между центром источника и центром ионизационной камеры. Измерения проводились при трех различных положениях аппликатора в фантоме.

Результаты и их обсуждение. Расстояние источник–камера определялось тремя способами.

Способ № 1: вычисление по формуле (1), для чего проводили измерения мощности воздушной кермы, создаваемой источником излучения в фантоме.

Способ № 2: с использованием полученных рентгеновских изображений фантома с аппликатором и размещенным в нем источником излучения. Для этого полученные рентгеновские изображения импортировались в систему дозиметрического планирования лечения, а затем вычисляли расстояние между координатами точек, соответствующих положениям центра капсулы с источником и центра ионизационной камеры.

Способ № 3: путем вычисления длины отрезка между точками, которые соответствуют центру ионизационной камеры и активной позиции источника, определенной при проведении реконструкции аппликатора в процессе планирования по рентгеновским изображениям. Определение расстояния источник–камера выполнялось последовательно для трех положений аппликатора в фантоме – на расстоянии 2, 3 и 4 см от центра держателя ионизационной камеры и ближайшей точкой аппликатора.

При помощи теста Колмогорова–Смирнова проведена проверка на нормальность. Для всех выборок значения наблюдаемого уровня значимости составило больше 0,05 (p -value > 0,05), то есть все выборки распределены нормально. В табл. 1 приведены значения статистических характеристик выборки, полученной в результате эксперимента.

Т а б л и ц а 1. Параметры распределения выборок

T a b l e 1. Sample distribution parameters

Параметр распределения	Расстояние источник–камера, рассчитанное по формуле (1), мм (способ № 1)			Расстояние источник–камера, измеренное по изображениям, мм (способ № 2)			Расстояние источник–камера, измеренное от активной позиции, мм (способ № 3)		
	Положение 1	Положение 2	Положение 3	Положение 1	Положение 2	Положение 3	Положение 1	Положение 2	Положение 3
Среднее значение	20,69	31,48	39,49	20,7	31,48	39,69	21,78	31,98	40,88
Стандартное отклонение	0,21	0,29	0,21	0,26	0,29	0,24	0,31	0,31	0,31
Минимальное значение	20,24	30,86	39,04	20,21	30,86	39,17	20,24	31,31	40,21
Максимальное значение	21,05	31,99	39,85	21,14	31,99	40,10	22,32	32,52	41,42

Далее для сравнения выборок между собой применялся дисперсионный анализ. По результатам данного анализа был сделан вывод о том, что различия между выборками значимы. Для того чтобы выяснить, между какими группами имеются различия, применялся метод множественных сравнения Шеффе. Результаты представлены в табл. 2 и на рис. 2.

Таким образом, различия между способами № 1 и 2 оказались не значимы для расстояний менее 3 см от источника излучения до ионизационной камеры. Реконструкция аппликатора, проведенная для определения расстояния источник–камера способом № 3, выполнялась от дистальной позиции остановки источника до зоны интереса с запасом в 1–2 см. Данный процесс вносит дополнительные неопределенности в измерения, что является одной из основных причин более значительного отклонения по сравнению со способами № 1 и 2. В то же время реконструкция криволинейного канала аппликатора может приводить к дополнительным неопределенностям по причине несоответствия положения тросика источника и положения центра капсулы при движении вдоль канала аппликатора. Существующие на данный момент способы реконструкции в системах дозиметрического планирования не позволяют полностью исключить погрешность реконструкции криволинейного канала, так как путь движения капсулы источника

зачастую меньше, чем путь движения тросика. Это связано с особенностями конструкции аппликаторов и привода источника в аппарате.

Измерения способом №1 менее трудоемки, однако требуют наличия цифрового изоцентрического рентгеновского аппарата, установленного в процедурном помещении. Использование данного способа обнаружения источника излучения в аппликаторе является предпочтительным. Погрешность определения расстояния по рентгеновским снимкам определяется исходя из точности реконструкции полученных рентгеновских изображений. Качество данных изображений было проверено с использованием геометрического фантома рентгеновского аппарата в соответствии с инструкцией по техническому обслуживанию. Величина отклонений измеренных расстояний для фантома составляла менее 0,5 мм для расстояний 80–100 мм.

Измерения способом №2 не требуют установки рентгеновского аппарата в процедурном помещении и могут осуществляться с использованием оборудования, предназначенного для ежемесячного контроля качества аппаратов для брахитерапии, а также предложенного фантома. Как видно на рис. 1 и в табл. 2, данные, полученные способами №1 и №2, отличаются в незначительной степени. Использование предложенного фантома позволит не только определить точность установки источника излучения в позиции пребывания в канале аппликатора, но и проводить верификацию планов облучения для различных типов аппликаторов, в том числе с применением экранирующих блоков.

Измерения способом №3 могут проводиться только оборудованием для получения изображений, которое применяется в рутинной клинической практике. Данный тип проверок можно использовать при необходимости измерений геометрических параметров аппликатора и предполагаемых мест расположения источника излучения в канале в каждой допустимой позиции пребывания. Основное преимущество такого способа контроля – отсутствие необходимости эксплуатации дополнительного оборудования, а также простота выполнения. Однако данный способ не обладает высокой точностью, так как требуется проведение реконструкции аппликатора. Это вносит дополнительные погрешности в измерения, особенно при наличии аппликатора с криволинейной формой канала для движения источника излучения. Проверку геометрических параметров аппликаторов предпочтительнее выполнять периодически в процессе их использования, а также для аппликаторов ручного изготовления перед каждым клиническим применением. Это позволит сократить время, затрачиваемое на проведение процедур контроля качества. Однако данный способ не подходит для определения позиции пребывания источника, что является важным этапом ввода аппликаторов в клиническую эксплуатацию.

Т а б л и ц а 2. Результаты дисперсионного анализа (критический уровень значимости 0,05)

Table 2. Results of the analysis of variance (critical significance level 0.05)

Способ	Способ №1	Способ №2	Способ №3
<i>Положение 1</i>			
Способ №1	–	$p = 0,967$	$p = 0,000$
Способ №2	$p = 0,967$	–	$p = 0,000$
Способ №3	$p = 0,000$	$p = 0,000$	–
<i>Положение 2</i>			
Способ №1	–	$p = 0,005$	$p = 0,000$
Способ №2	$p = 0,005$	–	$p = 0,000$
Способ №3	$p = 0,000$	$p = 0,000$	–
<i>Положение 3</i>			
Способ №1	–	$p = 0,001$	$p = 0,000$
Способ №2	$p = 0,001$	–	$p = 0,000$
Способ №3	$p = 0,000$	$p = 0,000$	–

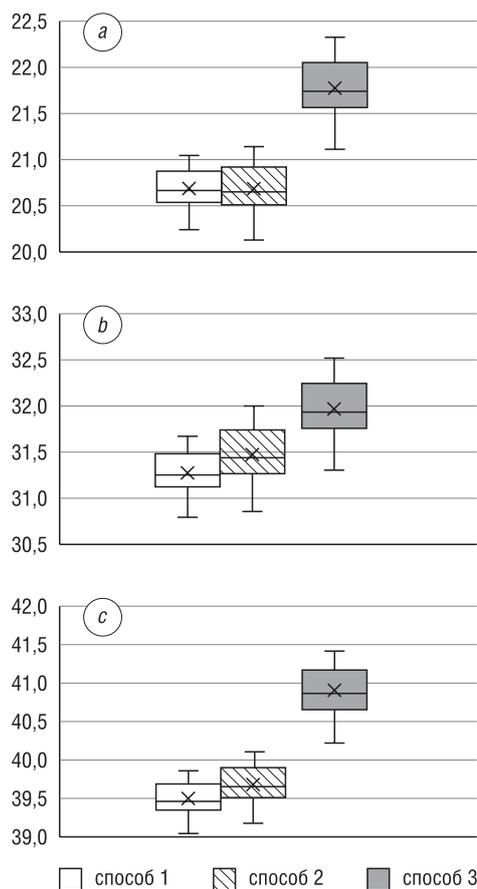


Рис. 2. Диаграммы распределения значений расстояний источник-камера при различных положениях аппликатора: а – положение 1, б – положение 2, с – положение 3

Fig. 2. Diagrams of the distribution of source-camera distance values for different positions of the applicator: a – position 1, b – position 2, c – position 3

Использование предложенного фантома для получения изображений (рентгеновских и компьютерной томографии) аппликатора в воде позволит повысить качество визуализации и, как следствие, – реконструкции аппликатора.

Заключение. Проведено исследование способов оценки точности пребывания источника излучения в терапевтической позиции в рамках процедуры контроля качества при вводе аппликаторов в клиническую эксплуатацию. Применение изоцентрического рентгеновского аппарата в процедурном помещении дает широкий спектр возможностей для проведения процедур контроля качества аппликаторов. Наличие качественного цифрового изображения источника излучения дает возможность точно идентифицировать позиции пребывания в канале аппликаторов, что позволяет повысить точность доставки дозы, особенно при использовании аппликаторов индивидуального изготовления.

Предложен фантом для проведения процедур контроля качества при вводе аппликаторов в клиническую эксплуатацию. Измерение мощности дозы от источника в фантоме может быть использовано при проведении процедур контроля качества аппликаторов с рентгенозащитными вставками. Это позволит выявить реальный коэффициент пропускания защитных пластин, в том числе дозу в полутени защитных приспособлений.

Предложенное устройство предоставляет широкие возможности для проведения контроля качества аппликаторов и позволит проводить различные измерения для любого типа аппликаторов. Геометрические ошибки в определении положения источников могут привести к различиям между расчетом дозового распределения и доставленной на аппарате дозой. Внедрение соответствующих процедур контроля качества в клиническую практику минимизирует погрешности отпуска дозы с использованием различных типов аппликаторов. Правильная и корректная стратегия реконструкции аппликатора обеспечит уровень погрешности реконструкции для значительного снижения влияния на доставку дозы. При правильном проведении контроля качества неопределенность реконструкции, как правило, меньше, чем другие неопределенности брахитерапии (движение органов в процессе подготовки и оконтуривание мишени и органов риска).

Список использованных источников

1. Comprehensive QA for radiation oncology: report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 40 / G. J. Kutcher [et al.] // *Med. Phys.* – 1994. – Vol. 21, №4. – P. 581–618. <https://doi.org/10.1118/1.597316>
2. Valentin, J. Prevention of high-dose-rate brachytherapy accidents. ICRP Publication 97 / J. Valentin // *Ann. ICRP.* – 2005. – Vol. 35, №2. – P. 1–51. <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2005.05.002>
3. A novel system for commissioning brachytherapy applicators: example of a ring applicator / G. P. Fonseca [et al.] // *Phys. Med. Biol.* – 2017. – Vol. 62, №21. – Art. 8360. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/aa8d0a>
4. Consequences of random and systematic reconstruction uncertainties in 3D image based brachytherapy in cervical cancer / K. Tanderup [et al.] // *Radiother. Oncol.* – 2008. – Vol. 89, №2. – P. 156–163. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2008.06.010>
5. Commissioning of Varian ring & tandem HDR applicators: reproducibility and interobserver variability of dwell position offsets / R. McMahon [et al.] // *J. Appl. Clin. Med. Phys.* – 2011. – Vol. 12, №4. – Art. 3447. <https://doi.org/10.1120/jacmp.v12i4.3447>
6. Source position verification and dosimetry in HDR brachytherapy using an EPID / R. L. Smith [et al.] // *Med. Phys.* – 2013. – Vol. 40, №11. – Art. 111706. <https://doi.org/10.1118/1.4823758>
7. EPID-based Quality Assurance Technique for HDR Ring and Tandem Source Dwell Positions with the Nucletron Flexitron Afterloader / C. Tam [et al.] // *Brachytherapy.* – 2014. – Vol. 13, №1. – P. S15e-S126. <https://doi.org/10.1016/j.brachy.2014.02.286>
8. Awunor, O. A multicenter study to quantify systematic variations and associated uncertainties in source positioning with commonly used HDR afterloaders and ring applicators for the treatment of cervical carcinomas / O. Awunor, D. Berger, C. Kirisits // *Med. Phys.* – 2015. – Vol. 42, №8. – P. 4472–4483. <https://doi.org/10.1118/1.4923173>
9. Awunor, O. Direct reconstruction and associated uncertainties of (192)Ir source dwell positions in ring applicators using gafchromic film in the treatment planning of HDR brachytherapy cervix patients / O. Awunor, B Dixon, C Walker // *Phys. Med. Biol.* – 2013. – Vol. 58, №10. – P. 3207–3225. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/58/10/3207>
10. *In vivo* dosimetry in brachytherapy / K. Tanderup [et al.] // *Med. Phys.* – 2013. – Vol. 40, №7. – Art. 070902. <https://doi.org/10.1118/1.4810943>
11. The ESTRO-QUALity assurance network for brachytherapy geometric check / A. Roue [et al.] // *ESTRO news.* – 2003. – №56. – P. 8–9.
12. *In vivo* dosimetry in brachytherapy: Requirements and future directions for research, development, and clinical practice / G. P. Fonseca [et al.] // *Phys. Imaging Radiat. Oncol.* – 2020. – Vol. 16. – P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.phro.2020.09.002>

References

1. Kutcher G. J., Coia L., Gillin M., Hanson W. F., Leibel S., Morton R. J., Palta J. R., Purdy J. A., Reinstein L. E., Svensson G. K., et al. Comprehensive QA for radiation oncology: report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 40. *Medical Physics*, 1994, vol. 21, no. 4, pp. 581–618. <https://doi.org/10.1118/1.597316>
2. Valentin J. Prevention of high-dose-rate brachytherapy accidents. ICRP Publication 97. *Annals of the ICRP*, 2005, vol. 35, no. 2, pp. 1–51. <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2005.05.002>
3. Fonseca G. P., van den Bosch M. R., Voncken R., Podesta M. A novel system for commissioning brachytherapy applicators: example of a ring applicator. *Physics in Medicine and Biology*, 2017, vol. 62, no. 21, art. 8360. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/aa8d0a>
4. Tanderup K., Hellebustb T. P., Lange S., Granfeldtd J., Pötterc R., Lindegaard J. C., Kirisitsc C. Consequences of random and systematic reconstruction uncertainties in 3D image based brachytherapy in cervical cancer. *Radiotherapy and Oncology*, 2008, vol. 89, no. 2, pp. 156–163. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2008.06.010>
5. McMahon R., Zhuang T., Steffey B. A., Song H. Commissioning of Varian ring & tandem HDR applicators: reproducibility and interobserver variability of dwell position offsets. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 2011, vol. 12, no. 4, art. 3447. <https://doi.org/10.1120/jacmp.v12i4.3447>
6. Smith R. L., Taylor M. L., McDermott L. N., Haworth A., Millar J. L., Franich R.D. Source position verification and dosimetry in HDR brachytherapy using an EPID. *Medical Physics*, 2013, vol. 40, no. 11, art. 111706. <https://doi.org/10.1118/1.4823758>
7. Tam C., Sonier M., Wronski M., Au P., Ravi A. EPID-based Quality Assurance Technique for HDR Ring and Tandem Source Dwell Positions with the Nucletron Flexitron Afterloader. *Brachytherapy*, 2014, vol. 13, no. 1, pp. S15e–S126. <https://doi.org/10.1016/j.brachy.2014.02.286>
8. Awunor, O., Berger D., Kirisits C. A multicenter study to quantify systematic variations and associated uncertainties in source positioning with commonly used HDR afterloaders and ring applicators for the treatment of cervical carcinomas. *Medical Physics*, 2015, vol. 42, no. 8, pp. 4472–4483. <https://doi.org/10.1118/1.4923173>
9. Awunor O., Dixon B., Walker C. Direct reconstruction and associated uncertainties of (192)Ir source dwell positions in ring applicators using gafchromic film in the treatment planning of HDR brachytherapy cervix patients. *Physics in Medicine and Biology*, 2013, vol. 58, no. 10, pp. 3207–3225. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/58/10/3207>
10. Tanderup K., Beddar S., Andersen C. E., Kertzscher G., Cygler J.E. *In vivo* dosimetry in brachytherapy. *Medical Physics*, 2013, vol. 40, no. 7, art. 070902. <https://doi.org/10.1118/1.4810943>
11. Roue A., Venselaar J., Ferreira I. H., Bridier A., Dutreix A. The ESTRO-QUALity assurance network for brachytherapy geometric check. *ESTRO news*, 2003, no. 56, pp. 8–9.
12. Fonseca G. P., Johansen J. G., Smith R. L., Beaulieu L., Beddar S., Kertzscher G., Verhaegen F., Tanderup K. *In vivo* dosimetry in brachytherapy: Requirements and future directions for research, development, and clinical practice. *Physics and Imaging in Radiation Oncology*, 2020, vol. 16, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.phro.2020.09.002>

Информация об авторе

Козловский Денис Иванович – магистр (медицинская физика), сотрудник отдела по инженерному обеспечению лучевой терапии, Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии имени Н.Н. Александрова (аг. Лесной, 223040, Минский район, Минская область, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0001-8165-7597>. E-mail: dn2007@tut.by

Information about the author

Dzianis I. Kazlouski – Master's Degree (Medical Physics), Employee of the Radiation Therapy Engineering Department, N.N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus (agro-town Lesnoy, 223040, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0001-8165-7597>. E-mail: dn2007@tut.by

**М. Л. Жемжуров, Г. М. Жмура, И. Е. Рубин, Г. З. Серебряный, Н. М. Днепровская,
Н. А. Тетерева, И. В. Руденков, Л. Ф. Бабичев**

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук
Беларуси, Прилесье, Минский район, Минская область, Республика Беларусь*

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕМОВ ПОДЛЕЖАЩИХ ГЛУБИННОМУ ЗАХОРОНЕНИЮ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В АКТИВИРОВАННЫХ РЕАКТОРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ В ПРОЦЕССЕ ИХ ВЫДЕРЖКИ ПОСЛЕ ОКОНЧАТЕЛЬНОГО ОСТАНОВА ЭНЕРГОБЛОКОВ БЕЛОРУССКОЙ АЭС

Аннотация. Представлены результаты расчетных исследований количества твердых высокоактивных и долгоживущих среднеактивных радиоактивных отходов (ВАО и ДСАО), образующихся при нейтронной активации материалов конструкций, прилегающих к активной зоне реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС, в зависимости от времени после окончательного останова реактора. Оценка объемов ВАО и ДСАО активационного происхождения, образующихся за 60 лет эксплуатации реактора ВВЭР-1200, выполнена на основании расчетных исследований наведенной активности конструкционных и защитных материалов с использованием реакторных и Монте-Карло программных кодов (SERPENT 2, TVS-M, DYN3D, MCU-PD). В результате расчетных исследований установлено, что массы и объемы активированных материалов, по уровням загрязнения относящихся к ВАО и ДСАО, в течение 10 лет после окончательного останова реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС будут составлять соответственно 273 т и 43 м³. В интервале 30–70 лет выдержки массы и объемы активированных материалов этих категорий РАО составят соответственно 262 т и 33 м³. При выдержке от 100 до 200 лет массы и объемы активированных материалов этих категорий РАО составят соответственно 118 т и 15 м³. Основной вклад в величину интегральной удельной активности материалов конструкций выгородки, шахты, наплавки, корпуса реактора, блока защитных труб (БЗТ), пространства под активной зоной, теплоизоляции в течение 10 лет после останова реактора будут вносить изотопы ⁵⁵Fe (период полураспада 2,7 года), ⁶⁰Co (5,27 года) и ⁶³Ni (96 лет), а после 10 лет выдержки – ⁶³Ni. Основной вклад в величину интегральной удельной активности материалов поглощающих элементов (ПЭЛ) с Ду₂TiO₅ в течение всего срока хранения будет вносить ⁶³Ni.

Ключевые слова: радиоактивные отходы атомных электростанций, высокоактивные твердые радиоактивные отходы, долгоживущие среднеактивные радиоактивные отходы, захоронение радиоактивных отходов

Для цитирования: Прогнозная оценка изменения объемов подлежащих глубинному захоронению радиоактивных отходов в активированных реакторных конструкциях в процессе их выдержки после окончательного останова энергоблоков Белорусской АЭС / М. Л. Жемжуров [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, № 3. – С. 332–344. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-332-344>

**Mikhail L. Zhemzhurov, Georgy M. Zhmura, Isaak E. Rubin, Grigory Z. Serebryany, Nina M. Dneprovskaya,
Natalia A. Tetereva, Ivanton V. Rudenkov, Leonid F. Babichev**

*Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, Prilesye village,
Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus*

PREDICTIVE EVALUATION OF CHANGES IN THE VOLUMES OF RADIOACTIVE WASTE TO BE DEEPLY DISPOSITIONED IN ACTIVATED REACTOR STRUCTURES IN THE PROCESS OF THEIR STORAGE AFTER THE FINAL SHUTDOWN OF THE BELARUSIAN NPP POWER UNITS

Abstract. This paper presents the results of computational studies of the amount of solid high-level and long-lived intermediate level radioactive waste (HLW and ILW-LL) generated during neutron activation of structural materials adjacent to the core of the VVER-1200 reactor of the Belarusian NPP, depending on the time after the final shutdown of the reactor. The assessment of the volumes of HLW and ILW-LL of activation origin, formed over 60 years of operation of the VVER-1200 reactor, was carried out on the basis of computational studies of the induced activity of structural and shielding materials using reactor and Monte Carlo program codes (SERPENT 2, TVS-M, DYN3D, MCU-PD). As a result of calculation studies, it was established that the masses and volumes of activated materials, according to the levels of pollution related to HLW and ILW-LL, within 10 years after the final shutdown of the VVER-1200 reactor of the Belarusian NPP will be 273 tons and 43 m³, respectively. In the interval of 30–70 years, the masses and volumes of activated materials of these categories of RW will amount to 262 t and 33 m³, respectively. From 100 years to 200 years, the masses and volumes of activated materials of these categories of RW will be 118 t and 15 m³, respectively. Within 10 years after the reactor shutdown, isotopes ⁵⁵Fe

(2.7 years), ^{60}Co (5.27 years), ^{63}Ni (96 years) will make the main contribution to the value of the integral specific activity of the materials of the structures of the fence, shaft, surfacing, reactor vessel, block of protective tubes (BPT), the space under the core, thermal insulation; after 10 years – ^{63}Ni . The main contribution to the value of the integral specific activity of materials of absorbing elements (PEL) with Dy_2TiO_5 during the entire period of storage will be made by ^{63}Ni .

Keywords: radioactive waste of nuclear power plants, solid high-level radioactive waste, long-lived intermediate level radioactive waste, burial of radioactive waste

For citation: Zhemzhurov M. L., Zhmura G. M., Rubin I. E., Serebryany G. Z., Dneprovskaya N. M., Teterova N. A., Rudenkov I. V., Babichev L. F. Predictive evaluation of changes in the volumes of radioactive waste to be deeply disposed in activated reactor structures in the process of their storage after the final shutdown of the Belarusian NPP power units. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 3, pp. 332–344 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-332-344>

Введение. В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ и требованиями, содержащимися в национальных нормативных документах, процесс вывода блоков АЭС из эксплуатации должен учитываться, начиная со стадии проектирования станции. Для этого уже на этом этапе необходима оценка объема и радиационных характеристик отходов, которые будут образовываться при выводе энергоблока из эксплуатации.

Вывод из эксплуатации блока АЭС может осуществляться различными способами (вариантами) [1], выбор которых определяется национальной технической политикой, реализуемой при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии, либо путем многофакторного анализа ряда технико-экономических, социальных и других факторов.

Действующими нормативными документами ряда стран предусматривается реализация следующих базовых вариантов вывода из эксплуатации отработавших назначенный срок службы блоков АЭС: захоронение, немедленная ликвидация, отложенная ликвидация (в зарубежной нормативно-технической литературе они имеют следующие обозначения: ENTOMB, DECON и SAFSTOR).

Вариант «захоронение» предполагает локализацию и захоронение высокоактивных конструкций, систем и оборудования, как правило, на их штатном месте за счет создания защитных барьеров, исключающих несанкционированный доступ к ним и распространение радиоактивности в окружающую среду. Следует отметить, что указанный вариант не соответствует установленным в Республике Беларусь нормативным требованиям к захоронению радиоактивных отходов (РАО) в зависимости от их класса и общим критериям приемлемости данных отходов для захоронения.

Вариант «немедленная ликвидация» предполагает полный демонтаж строительных конструкций, систем и оборудования после подготовительного этапа и последующую рекультивацию (восстановление) площадки АЭС. Работы по демонтажу высокоактивных конструкций реактора, других радиоактивно загрязненных систем и оборудования производятся практически сразу после окончательного останова блока АЭС, выгрузки и удаления ядерного топлива. Недостатком данного варианта являются большие материальные и финансовые затраты, обусловленные высоким уровнем радиоактивности и большим объемом РАО различных классов.

Вариант «отложенная ликвидация» заключается в полном демонтаже конструкций реактора, систем и оборудования, производимом после этапа их длительной безопасной выдержки под наблюдением в целях естественного спада радиоактивности до уровня, приемлемого для проведения демонтажных работ на базе имеющихся средств технологического оснащения.

В отношении образуемых при ликвидации энергоблока высокоактивных радиоактивных отходов (ВАО) их длительная выдержка может также требоваться для снижения объемного энерговыделения до значений, регламентированных для РАО классов 1 и 2, и перевода РАО класса 1 в класс 2 для упрощения системы захоронения. Кроме того, за счет выдержки может быть снижена мощность дозы гамма-излучения на поверхности планируемых к использованию упаковок РАО до значений, регламентируемых правилами безопасности при транспортировании радиоактивных материалов.

Продолжительность этапа длительной выдержки должна определяться в результате детальных технико-экономических оптимизационных расчетов и может составить от 30 до 100 лет. Следует отметить, что необходимость организации длительного хранения ВАО и долгоживущих среднеактивных радиоактивных отходов (ДСАО) и сроки хранения при реализации варианта «отложенная ликвидация» для вывода из эксплуатации энергоблоков Белорусской АЭС

могут быть обусловлены сроками создания и введения в эксплуатацию пункта глубинного захоронения РАО. Согласно классификации РАО для обеспечения долгосрочной безопасности при захоронении ВАО и ДСАО включены в классы 1 и 2 и должны захораниваться в глубоких геологических формациях. Проработка вопроса о сооружении пункта захоронения РАО высокой активности, образуемых в результате эксплуатации Белорусской АЭС, в глубокой геологической формации является одной из основных задач «Стратегии обращения с радиоактивными отходами Белорусской атомной электростанции» (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 2 июня 2015 г., №460 «Об утверждении стратегии обращения с радиоактивными отходами Белорусской атомной электростанции»).

Таким образом, для разработки технических предложений, прогнозных план-графиков по организации системы обращения с ВАО и ДСАО в процессе вывода из эксплуатации Белорусской АЭС, возможных технологических и конструктивных решений по системе глубинного захоронения этих РАО необходимо иметь прогнозные количественные данные по объемам и массе активированных реакторных конструкций, относящихся по уровню удельной активности к ВАО и ДСАО, в зависимости от длительности их выдержки после окончательного останова энергоблока.

Расчетное прогнозирование объемов радиоактивных отходов, образующихся в результате нейтронной активации бетонов радиационной защиты за срок эксплуатации реактора типа ВВЭР, в зависимости от длительности их выдержки после окончательного останова реактора рассмотрено в [2–4]. Данные по активности конструкций реакторной установки исходя из времени после ее останова представлены в материалах проекта Белорусской АЭС и частично опубликованы в [1, 2]. В [2] выполнено расчетное моделирование активации элементов конструкций реактора при эксплуатации АЭС с ВВЭР-1200, при этом в соответствии с российскими санитарными правилами обращения с РАО (СанПиН 2.6.6.2796-10 «Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами (СПОРО-2002)») все конструкции реактора были разделены на три группы твердых РАО (высоко-, средне- и низкоактивные). Однако в настоящее время проектные и литературные данные по объемам активированных РАО отдельно по категориям, в том числе подлежащих глубинному захоронению ВАО и ДСАО, в зависимости от длительности их выдержки после окончательного останова реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС отсутствуют.

Цель настоящего исследования – получение прогнозных количественных данных по объемам и массе активированных реакторных конструкций, относящихся по уровню удельной активности к ВАО и ДСАО, в зависимости от длительности их выдержки после окончательного останова энергоблока Белорусской АЭС.

Методика исследований. Для расчета количественных изменений ВАО и ДСАО в активированных реакторных конструкциях в процессе их выдержки после завершения эксплуатации энергоблока использованы полученные авторами настоящей публикации в [5–7] результаты оценки объемов и радиационных характеристик ВАО и ДСАО на момент останова реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС. В указанных работах расчеты наведенной активности конструкционных и защитных материалов производились для срока эксплуатации реактора 60 лет с использованием реакторных и Монте-Карло программных кодов: SERPENT 2 (трехмерный Монте-Карло код расчета реакторов, VTT Technical Research Centre of Finland, лицензия № L1K002/JIPNRMINSK); ТВС-М (аттестационный паспорт от 21.02.2002 №135); DYN3D (лицензионное соглашение №0012011 между Центром им. Гельмгольца Дрезден-Россендорф, Германия, и Объединенным институтом энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси); MCU-PD (аттестационный паспорт от 24.10.2018 №456).

Прогнозные данные по активностям ВАО и ДСАО, образующихся в результате активации нейтронами конструкционных и защитных материалов реактора ВВЭР-1200 за 60 лет эксплуатации Белорусской АЭС, в зависимости от времени выдержки после останова реактора, были получены на основе данных на момент останова с учетом радиоактивного распада по формуле [8]

$$A_i(t) = A_i(0)e^{-0,693\frac{t}{T}},$$

где A_i – активность i -го радионуклида, Бк; $A_i(0)$ – активность радионуклида на момент останова реактора, Бк; T – период полураспада радионуклида, с; t – время после останова, с.

Характеристики наиболее облучаемых элементов конструкции реактора ВВЭР-1200, рассматриваемых в расчетах, приведены в табл. 1. Расчетная геометрия конструкции реактора представлена 38 участками (каждый элемент конструкции может состоять из нескольких участков в соответствии со схемой расположения активизируемых конструкций). Схемы расположения активизируемых конструкций и материалов в районе активной зоны реактора ВВЭР-1200 в радиальном и аксиальном направлениях представлены в [7].

Т а б л и ц а 1. Характеристики наиболее облучаемых элементов конструкции реактора ВВЭР-1200

T a b l e 1. Characteristics of the most irradiated structural elements of the VVER-1200 reactor

Элемент конструкции		Номер участка, <i>j</i>	Материал	Плотность, т/м ³	Активируемая масса, т	Объем, м ³
Выгородка		3	08X18H10T-Y	7,9	41,5	5,26
Шахта		15	08X18H10T-Y	7,9	24,1	3,05
		31		13,7	1,74	
Плита нижняя БЗТ высотой 34,7 см (без ПЭЛ)		9	08X18H10T-Y	7,9	14,6	1,84
ПЭЛ в плите нижней высотой 34,7 см			42XHM + Dy ₂ TiO ₅	5,65	0,20	0,04
БЗТ без плит и ПЭЛ (слой высотой 20 см)		10–14	08X18H10T-Y	7,9	1,51	0,19
ПЭЛ (B ₄ C, каждый слой 20 см высотой)			42XHM + B ₄ C	3,25	0,081	0,025
ПЭЛ (Dy ₂ TiO ₅) в зоне концевиков твэлов, слой высотой 13,7 см		1	42XHM + Dy ₂ TiO ₅	5,65	0,09	0,016
ПЭЛ (Dy ₂ TiO ₅) в зоне направляющих каналов, слой высотой 5 см		2			0,034	0,006
Поглотитель ПЭЛ Dy ₂ TiO ₅		29	Dy ₂ TiO ₅	4,9	0,0079	0,0016
Оболочка ПЭЛ		30	42XHM	7,9	0,0042	0,0005
Пространство под активной зоной (каждый слой высотой 20 см)		4–8	08X18H10T-Y	7,9	1,52	0,19
Внутрикорпусная наплавка		16	08X18H10T + Nb	7,9	3,97	0,50
		32		2,27	0,29	
Корпус (без наплавки)		17	15XHMФА	7,9	91,4	11,57
		33		52,3	6,62	
Теплоизоляция	Нижняя часть	34	09Г2С + 08X18H10Т	1,09	2,22	2,04
	Основная часть	18			7,38	6,78
	Верхняя часть	19			1,44	1,32
Сухая защита	Левая нижняя часть	35	Серпентинитовый бетон + сталь 3	3,45	14,1	4,09
	Левая основная часть	20			47,0	13,6
	Левая верхняя часть	21			9,18	2,66
	Правая нижняя часть	36			24,1	7,0
	Правая основная часть	22			80,4	23,3
Опорная ферма	Нижняя часть	25	Серпентинитовый бетон + сталь 3	5,64	58,7	10,4
	Правая верхняя часть	26			58,7	10,4
	Левая верхняя часть	27			41,7	7,4
Биологическая защита		28	Серпентинитовый бетон + бор	2,78	19,6	7,05
Строительный бетон за сухой защитой	Левая нижняя часть	37	Строительный бетон с добавкой бора	2,2	9,6	4,3
	Левая основная часть	23			31,8	14,5
	Правая нижняя часть	38			10,1	4,6
	Правая основная часть	24			33,7	15,3

П р и м е ч а н и е. ПЭЛ – поглощающий элемент, БЗТ – блок защитных труб.

Т а б л и ц а 11. Массы (г) и объемы (м³) высокоактивных и долгоживущих среднеактивных радиоактивных отходов в зависимости от времени после останова реактора

Table 11. Weights (g) and volumes (m³) of high-level and long-lived intermediate level radioactive waste, depending on the time after the shutdown of the reactor

Элемент конструкции	Параметр	Время выдержки, лет									
		0	3	5	10	30	50	70	100	150	200
Выгородка	$V, \text{ м}^3$	5,26E+00	5,26E+00	5,26E+00	5,26E+00	5,26E+00	5,26E+00	5,26E+00	5,26E+00	5,26E+00	5,26E+00
	Масса, г	4,15E+07	4,15E+07	4,15E+07	4,15E+07	4,15E+07	4,15E+07	4,15E+07	4,15E+07	4,15E+07	4,15E+07
Шахта реактора	$V, \text{ м}^3$	4,78E+00	4,78E+00	4,78E+00	4,78E+00	4,78E+00	4,78E+00	4,78E+00	4,78E+00	4,78E+00	4,78E+00
	Масса, г	3,78E+07	3,78E+07	3,78E+07	3,78E+07	3,78E+07	3,78E+07	3,78E+07	3,78E+07	3,78E+07	3,78E+07
Наплавка	$V, \text{ м}^3$	7,90E-01	7,90E-01	7,90E-01	7,90E-01	7,90E-01	7,90E-01	7,90E-01	7,90E-01	7,90E-01	7,90E-01
	Масса, г	6,24E+06	6,24E+06	6,24E+06	6,24E+06	6,24E+06	6,24E+06	6,24E+06	6,24E+06	6,24E+06	6,24E+06
Корпус реактора	$V, \text{ м}^3$	1,82E+01	1,82E+01	1,82E+01	1,82E+01	1,82E+01	1,82E+01	1,82E+01			
	Масса, г	1,44E+08	1,44E+08	1,44E+08	1,44E+08	1,44E+08	1,44E+08	1,44E+08			
Теплоизоляция	$V, \text{ м}^3$	1,01E+01	1,01E+01	1,01E+01	1,01E+01						
	Масса, г	1,10E+07	1,10E+07	1,10E+07	1,10E+07						
БЗТ	$V, \text{ м}^3$	2,80E+00	2,80E+00	2,80E+00	2,80E+00	2,80E+00	2,80E+00	2,80E+00	2,80E+00	2,80E+00	2,80E+00
	Масса, г	2,22E+07	2,22E+07	2,22E+07	2,22E+07	2,22E+07	2,22E+07	2,22E+07	2,22E+07	2,22E+07	2,22E+07
Пространство под активной зоной	$V, \text{ м}^3$	9,62E-01	9,62E-01	9,62E-01	9,62E-01	9,62E-01	9,62E-01	9,62E-01	9,62E-01	9,62E-01	9,62E-01
	Масса, г	7,60E+06	7,60E+06	7,60E+06	7,60E+06	7,60E+06	7,60E+06	7,60E+06	7,60E+06	7,60E+06	7,60E+06
ПЭЛ (Dy ₂ TiO ₅) со сроком службы 10 года	$V, \text{ м}^3$	3,41E-01	3,41E-01	3,41E-01	3,41E-01	3,41E-01	3,41E-01	3,41E-01	3,41E-01	3,41E-01	3,41E-01
	Масса, г	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06	1,92E+06
ПЭЛ (Dy ₂ TiO ₅) со сроком службы 3 года	$V, \text{ м}^3$	4,20E-02	4,20E-02	4,20E-02	4,20E-02	4,20E-02	4,20E-02	4,20E-02	4,20E-02	4,20E-02	4,20E-02
	Масса, г	2,42E+05	2,42E+05	2,42E+05	2,42E+05	2,42E+05	2,42E+05	2,42E+05	2,42E+05	2,42E+05	2,42E+05
Сумма	$V, \text{ м}^3$	4,33E+01	4,33E+01	4,33E+01	4,33E+01	3,32E+01	3,32E+01	3,32E+01	1,50E+01	1,50E+01	1,50E+01
	Масса, г	2,73E+08	2,73E+08	2,73E+08	2,73E+08	2,62E+08	2,62E+08	2,62E+08	1,18E+08	1,18E+08	1,18E+08

П р и м е ч а н и е. ПЭЛ – поглощающий элемент, БЗТ – блок защитных труб.

В табл. 12 приведены сравнительные данные по интегральной активности элементов конструкций через 5 лет после останова реактора ВВЭР-1200, полученные в данной работе и в [1].

Отличие абсолютных величин процентного отклонения интегральных активностей материалов выгородки, шахты, корпуса, теплоизоляции, опорной фермы, полученных в данной работе, по сравнению с [1] составляет от 8 до 92 %. Учитывая различия расчетных методик, принятых в расчетах составов материалов, примесей, рассматриваемых изотопных составов совпадение можно считать удовлетворительным.

В результате выполненных расчетных исследований установлено, что при сроке службы реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС 60 лет при активации нейтронами близлежащих к активной зоне реакторных и защитных конструкций будут образованы ВАО и ДСАО в следующих количествах (на один энергоблок):

в стальных конструкциях выгородки, шахты массой 79,3 т и объемом 10 м³ – ВАО при выдержке до 200 лет;

в наплавке массой 6,24 т и объемом 0,79 м³ – ВАО на момент останова, а в период от 3 до 200 лет выдержки эти РАО будут относиться к ДСАО;

в части корпуса реактора массой 144 т и объемом 18,2 м³ – ДСАО в течение до 200 лет выдержки;

в теплоизоляции массой 11 т и объемом 10,1 м³ – ДСАО до 10 лет выдержки, а после 30 лет эти РАО к ДСАО уже не относятся;

Т а б л и ц а 12. Интегральные активности элементов конструкций через 5 лет после останова реактора ВВЭР-1200

Table 12. Integral activity of structural elements 5 years after the shutdown of the VVER-1200 reactor

Элемент конструкции	А, Бк	А, Бк [1]	$\frac{(A_{[1]} - A)}{A_{[1]}} \times 100, \%$
Выгородка	9,59E+16	1,57E+17	38,9
Шахта	9,98E+15	1,09E+16	8,4
Корпус с наплавкой	1,00E+14	1,25E+15	92,0
Теплоизоляция	1,87E+12	1,20E+12	-55,8
БЗТ	1,55E+14	4,27E+14	63,7
Опорная ферма	5,20E+11	7,36E+11	29,3

в стальных конструкциях БЗТ общей массой 22,2 т и объемом 2,8 м³ – ВАО на момент останова, а в период от 3 до 200 лет выдержки эти РАО будут являться ДСАО;

в металлоконструкциях пространства под активной зоной общей массой 7,6 т и объемом 0,96 м³ – ВАО в течение до 200 лет выдержки;

в материалах ПЭЛ (Dy₂TiO₅) со сроком их службы 10 лет общей массой 1,92 т и объемом 0,34 м³ – ВАО в течение до 200 лет выдержки;

в материалах ПЭЛ (Dy₂TiO₅) со сроком их службы 3 года общей массой 0,242 т и объемом 4,2·10⁻² м³ – ВАО в течение до 200 лет выдержки.

Выполненные расчеты показывают, что в широких диапазонах времен выдержки прогнозные суммарные количества подлежащих глубинному захоронению рассматриваемых ВАО и ДСАО остаются постоянными. Массы и объемы активированных материалов, по уровням загрязнения относящихся к ВАО и ДСАО, в течение 10 лет выдержки после окончательного останова реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС будут составлять соответственно 273 т и 43 м³. В интервале 30–70 лет выдержки массы и объемы активированных материалов этих категорий РАО составят соответственно 262 т и 33 м³. При выдержке от 100 до 200 лет массы и объемы активированных материалов этих категорий РАО составят соответственно 118 т и 15 м³.

В остальных диапазонах времен выдержки происходит изменение суммарного количества ВАО и ДСАО из-за перераспределения РАО между категориями. Из табл. 11 видно, что материалы наплавки и БЗТ в течение трех лет с момента останова реактора перейдут из категории ВАО в ДСАО. Материалы корпуса реактора в течение периода 70–100 лет и материалы теплоизоляции в течение периода 10–30 лет выдержки перестают быть ДСАО. Следует отметить, что использованные в данной работе программные средства позволяют рассчитать точное время перехода РАО из одной категории в другую и, соответственно, количество ВАО и ДСАО для заданного времени выдержки.

В течение 10 лет после останова реактора изотопы ⁵⁵Fe (период полураспада 2,7 года), ⁶⁰Co (5,27 года), ⁶³Ni (96 лет) будут вносить основной вклад в величину интегральной удельной активности материалов конструкций выгородки, шахты, наплавки, корпуса реактора, БЗТ, пространства под активной зоной, теплоизоляции, а после 10 лет выдержки доминирующей является активность изотопа ⁶³Ni. Основной вклад в величину интегральной удельной активности материалов ПЭЛ (Dy₂TiO₅) в течение всего срока хранения будет вносить изотоп ⁶³Ni.

Расчетные исследования активации материалов сухой защиты, строительного бетона, опорной фермы и биологической защиты реактора показали, что данные элементы конструкции с момента останова реактора не будут относиться ни к ВАО, ни к ДСАО. При активации материалов этих элементов конструкции учитывалось образование трития. Ввиду ограничений по объему представляемых материалов в данной работе эти расчеты не даны.

Заключение. В результате расчетных исследований установлено, что массы и объемы активированных материалов, по уровням загрязнения относящихся к ВАО и ДСАО, в течение 10 лет выдержки после окончательного останова реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС будут составлять соответственно 273 т и 43 м³. В интервале 30–70 лет выдержки массы и объемы активированных материалов категорий ВАО и ДСАО составят соответственно 262 т и 33 м³. При выдержке от 100 до 200 лет массы и объемы активированных материалов этих категорий РАО составят соответственно 118 т и 15 м³. В остальных диапазонах времен выдержки происходит изменение суммарного количества ВАО и ДСАО из-за перераспределения РАО между категориями.

Полученные прогнозные количественные данные используются при разработке технических предложений, прогнозных план-графиков по организации системы обращения с ВАО и ДСАО в процессе вывода из эксплуатации Белорусской АЭС, возможных технологических и конструктивных решений по системе глубинного захоронения этих РАО.

Благодарности

Авторы выражают благодарность специалистам отдела по обращению с РАО Санкт-Петербургского филиала АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» – «ВНИПИЭТ» за советы и ценные замечания при выполнении данной работы.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the specialists of the Department for the treatment of RAW materials of the St. Petersburg Branch of JSC “FCNIVT “SNPO “Aileron” – “VNIPIET” for advice and valuable comments when performing this work.

Список использованных источников

1. Практические основы разработки и обоснования технических характеристик и безопасности эксплуатации реакторных установок типа ВВЭР. – М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2015. – 480 с.
2. Радиационные характеристики реакторных конструкций после окончательного останова АЭС с ВВЭР / Б.К. Былкин [и др.] // Атом. энергия. – 2009. – Т. 106, вып. 1. – С. 56–60.
3. К определению категории РАО для бетонов радиационной защиты ядерных установок при их выводе из эксплуатации / Б.К. Былкин [и др.] // Атом. энергия. – 2016. – Т. 121, вып. 5. – С. 298–301.
4. Наведенная активность радиационной защиты в проблеме вывода из эксплуатации ядерных установок / Б.К. Былкин [и др.] // Ядер. и радиац. безопасность. – 2017. – №3 (85). – С. 1–14.
5. Оценка объемов подлежащих глубинному захоронению радиоактивных отходов, образующихся в результате активации конструкционных и защитных материалов реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС / М.Л. Жемжуров [и др.] // Материалы 8-й Международ. конф. «Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии 21-го века». – Минск, 2020. – С. 11–21.
6. Calculation researches for the formation of high-level and long-life medium-level radioactive waste of activation origin for the VVER-1200 reactor of Belarusian NPP / M.L. Zhemzhurov [et al.] // Nonlinear Dynamics and Applications. – 2020. – Vol. 66. – P. 66–75.
7. Оценка объемов подлежащих глубинному захоронению радиоактивных отходов, образующихся в результате активации конструкционных материалов реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС / М.Л. Жемжуров [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2021. – Т. 66, №3. – С. 365–377. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-3-365-377>
8. Машкович, В.П. Защита от ионизирующих излучений: справочник / В.П. Машкович. – 3-е изд., перераб. и доп.– М.: Энергоатомиздат, 1982. – 296 с.

References

1. *Practical Foundations for the Development and Substantiation of Technical Characteristics and Operational Safety of VVER-type Reactor Plants*. Moscow, NRC “Kurchatov Institute”, 2015. 480 p. (in Russian).
2. Bylkin B. K., Yegorov A. L., Zhurbenko Ye. A., Tsofin V.I. Radiation characteristics of reactor structures after the final shutdown of a nuclear power plant with VVER. *Atomic Energy*, 2009, vol. 106, iss. 1, pp. 73–78. <https://doi.org/10.1007/s10512-009-9133-2>
3. Bylkin B. K., Engovatov I.A. Kozhevnikov A. N., Sinyushin D.K. Radioactivity Category Determination for Radiation-Protection Concrete in Nuclear Facilities Undergoing Decommissioning. *Atomic Energy*, 2017, vol. 121, iss. 5, pp. 383–387. <https://doi.org/10.1007/s10512-017-0216-1>
4. Bylkin B. K., Kozhevnikov A. N., Engovatov I. A., Sinyushin D.K. Induced activity of radiation shielding before NPP decommissioning. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' = Nuclear and Radiation Safety Journal*, 2017, no. 3 (85), pp. 1–14 (in Russian).
5. Zhemzhurov M. L., Zhmura G. M., Serebryanyy G. Z., Rubin I. E., Dneprovskaya N. M., Teterova N. A., Rudenkov I. V., Babichev L. F., Griбанова K. A., Kovalevich V.G. Estimation of the volumes of radioactive waste subject to deep burial, generated as a result of activation of structural and protective materials of the VVER-1200 reactor of the Belarusian NPP. *Materialy 8-i Mezhdunarodnoi konferentsii “Atomnaya energetika, yadernyye i radiatsionnyye tekhnologii 21-go veka”* [Materials of the 8th International Conference “Nuclear Power Engineering, Nuclear and Radiation Technologies of the 21st Century”]. Minsk, 2020, pp. 11–21 (in Russian).
6. Zhemzhurov M. L., Zhmura G. M., Serebryanyy G. Z., Rubin I. E., Dneprovskaya N. M., Teterova N. A., Rudenkov I. V., Babichev L. F., Yrashevich K. A., Kovalevich V. G. Calculation researches for the formation of high-level and long-life medium-level radioactive waste of activation origin for the VVER-1200 reactor of Belarusian NPP. *Nonlinear Dynamics and Applications*, 2020, vol. 66, pp. 66–75.
7. Zhemzhurov M. L., Zhmura G. M., Rubin I. E., Serebryanyy G. Z., Dneprovskaya N. M., Teterova N. A., Rudenkov I. V., Babichev L.F. Calculation researches for the formation of high-level and long-life medium-level radioactive waste of activation origin for the VVER-1200 reactor of Belarusian NPP. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 3, pp. 365–377 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-3-365-377>
8. Mashkovich V.P. *Ionizing Radiation Protection*. 3rd ed. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1982. 296 p. (in Russian).

Информация об авторах

Жемжуров Михаил Леонидович – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией радиационно-химических исследований окружающей среды, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (Луговослободской с/с, д. Прилесье, 47/17, 223063, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: jema@sosny.bas-net.by

Жмура Георгий Митрофанович – старший научный сотрудник лаборатории радиационно-химических исследований окружающей среды, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (Луговослободской с/с, д. Прилесье, 47/17, 223063, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: georgiyzhmura@mail.ru

Рубин Исаак Ефимович – старший научный сотрудник лаборатории нейтронной физики Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (Луговослободской с/с, д. Прилесье, 47/17, 223063, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: rubin@sosny.bas-net.by

Серебряный Григорий Зиновьевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории радиационно-химических исследований окружающей среды, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (Луговослободской с/с, д. Прилесье, 47/17, 223063, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: silver@sosny.bas-net.by

Днепровская Нина Михайловна – научный сотрудник лаборатории нейтронной физики, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (Луговослободской с/с, д. Прилесье, 47/17, 223063, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: dneprnina@mail.ru

Тетерева Наталья Александровна – научный сотрудник лаборатории нейтронной физики, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (Луговослободской с/с, д. Прилесье, 47/17, 223063, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: tetna@mail.ru

Руденков Ивантон Владимирович – младший научный сотрудник лаборатории моделирования суперкомпьютерных технологий в ядерной физике и энергетике Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (Луговослободской с/с, д. Прилесье, 47/17, 223063, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: godder@tut.by

Бабичев Леонид Филипович – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией моделирования суперкомпьютерных технологий в ядерной физике и энергетике, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (Луговослободской с/с, д. Прилесье, 47/17, 223063, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: babichev@sosny.bas-net.by

Information about the authors

Mikhail L. Zhemzhurov – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Laboratory of Radiation and Chemical Research of the Environment, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/17, Prilesye village, Lugovoslobodskaya village, 223063, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: jema@sosny.bas-net.by

Georgy M. Zhmura – Senior Researcher of the Laboratory of Radiation and Chemical Research of the Environment, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/17, Prilesye village, Lugovoslobodskaya village, 223063, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: georgiyzhmura@mail.ru

Isaak E. Rubin – Senior Researcher of the Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/17, Prilesye village, Lugovoslobodskaya village, 223063, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: rubin@sosny.bas-net.by

Grigory Z. Serebryany – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher of the Laboratory of Radiation and Chemical Research of the Environment, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/17, Prilesye village, Lugovoslobodskaya village, 223063, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: silver@sosny.bas-net.by

Nina M. Dneprovskaya – Researcher of the Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/17, Prilesye village, Lugovoslobodskaya village, 223063, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: dneprnina@mail.ru

Natalia A. Tetereva – Researcher of the Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/17, Prilesye village, Lugovoslobodskaya village, 223063, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: tetna@mail.ru

Ivanton V. Rudenkov – Junior Researcher of the Laboratory of Modeling of Supercomputer Technologies in Nuclear Physics and Power Engineering, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/17, Prilesye village, Lugovoslobodskaya village, 223063, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: godder@tut.by

Leonid F. Babichev – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of the Laboratory for Modeling Supercomputer Technologies in Nuclear Physics and Power Engineering, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/17, Prilesye village, Lugovoslobodskaya village, 223063, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: babichev@sosny.bas-net.by