



**ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ.  
СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**2021 Том 22 № 4**

**DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-4**

**<http://journals.rudn.ru/engineering-researches>**

**Научный журнал**

**Издается с 2000 г.**

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

**Свидетельство о регистрации** ПИ № ФС 77-61174 от 30.03.2015 г.

**Учредитель:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов»

---

**Главный редактор**

*Разумный Юрий Николаевич* – доктор технических наук, профессор, директор Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

**Заместитель главного редактора**

*Резник Сергей Васильевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции» факультета «Специальное машиностроение», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**Ответственный секретарь**

*Агасиева Светлана Викторовна* – кандидат технических наук, доцент кафедры нанотехнологий и микросистемной техники Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

**Члены редакционной коллегии**

*Азравал Бридж* – профессор, Военно-морская школа, Монтерей, США

*Алифанов Олег Михайлович* – академик РАН, доктор технических наук, профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

*Варатараджу Ренугант* – профессор, Университет Путра Малайзия, Серданг, Малайзия

*Василе Массимилиано Л.* – профессор, Университет Стратклайда, Глазго, Великобритания

*Вивiani Антонио* – профессор, Университет Кампани «Луиджи Ванвители», Неаполь, Италия

*Гасбарри Паоло* – профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

*Герман Анна* – профессор, Университет Бейра Интериор, Ковильян, Португалия

*Гитас Иоаннис Зоис* – профессор, Университет Аристотеля в Салониках, Салоники, Греция

*Грациани Филиппо* – почетный профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

*Гурфил Пини* – профессор, Израильский технологический институт, Хайфа, Израиль

*Дэса Мориба* – доцент, Техасский университет в Остине, Остин, США

*Дженна Джанкарло* – профессор, Туринский политехнический институт, Турин, Италия

*Кавазути Дзюньитиро* – профессор, Японское агентство аэрокосмических исследований, Токио, Япония

*Кадугин Владимир Тимофеевич* – доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

*Капустин Владимир Михайлович* – доктор технических наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, Москва, Россия

*Кузнецов Николай Борисович* – профессор, Геологический институт РАН, Москва, Россия

*Лишарес Ричард* – профессор, Массачусетский технологический институт, Кембридж, США

*Матюшин Максим Михайлович* – доктор технических наук, Центр управления полетами АО «ЦНИИмаш» ГК «Роскосмос», Королев, Россия

*Медведев Андрей Всеволодович* – доктор физико-математических наук, член-корреспондент СО РАН, Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

*Мисра Арун* – профессор, Университет Макгилла, Монреаль, Канада

*Мортари Даниэле* – профессор, Техасский университет A&M, Колледж-Стейшн, США

*Мохаммед Сейду О.* – профессор, Национальное агентство по космическим исследованиям и развитию, Абуджа, Нигерия

*Палмерини Джованни* – профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

*Петухов Вячеслав Георгиевич* – доктор технических наук, член-корреспондент РАН, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

*Попков Юрий Соломонович* – академик РАН, доктор технических наук, профессор, Институт системного анализа ФИЦ «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия

*Попов Гарри Алексеевич* – академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики, Москва, Россия

*Прадо Антонио* – профессор, Национальный институт космических исследований, Сан-Жозе-дус-Кампус, Бразилия

*Редько Иван Яковлевич* – доктор технических наук, профессор, АО «Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского», Москва, Россия

*Спенсер В. Дэвид* – профессор, Университет штата Пенсильвания, Университи-Парк, США

*Фурфаро Роберто* – профессор, Университет Аризоны, Тусон, США

*Челани Фабио* – профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

*Черн Рок Ченг-Шинг* – профессор, Университет Райерсона, Торонто, Канада

*Ясака Тэцуо* – почетный профессор, Университет Кюсю, Фукуока, Япония

**ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ.  
СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**ISSN 2312-8143 (Print); ISSN 2312-8151 (Online)**

Периодичность: 4 выпуска в год (ежеквартально).

Сайт журнала: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> (открытый доступ).

Языки: русский, английский.

Журнал индексируют: РИНЦ, DOAJ, Ulrich's Periodicals Directory, Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, East View, Dimensions, EBSCOhost.

**Цель и тематика**

Журнал «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования» – периодическое международное рецензируемое научное издание в области информатики, вычислительной техники и управления, авиационной и ракетно-космической техники, наук о земле. Журнал является международным по составу редакционной коллегии, авторам и тематике публикаций. В журнале публикуются результаты оригинальных научных исследований российских и зарубежных ученых.

Цели журнала:

- содействие развитию российских и зарубежных инженерных школ;
- продвижение и внедрение в практику современных перспективных разработок в указанных областях;
- научный обмен и сотрудничество между учеными.

Журнал адресован научным работникам, инженерам, аспирантам. Включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК при Минобрнауки России.

Выпуски журнала в полнотекстовом виде, правила оформления статей и дополнительная информация размещены на сайте <http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Редколлегия журнала строго придерживается международных стандартов публикационной этики, сформулированных в документе COPE (Committee on Publication Ethics): <http://publicationethics.org>

---

Редактор *Ю.А. Заикина*  
Компьютерная верстка: *Ю.А. Заикина*

**Адрес редакции:**

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3  
Тел.: +7 (495) 955-07-16; e-mail: [publishing@rudn.ru](mailto:publishing@rudn.ru)

**Адрес редакционной коллегии журнала «Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования»:**

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3  
Тел.: +7 (495) 955-07-92; e-mail: [engj@rudn.ru](mailto:engj@rudn.ru)

---

Подписано в печать 09.03.2022. Выход в свет 15.03.2022. Формат 60×84/8.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Times New Roman».  
Усл. печ. л. 6,51. Тираж 500 экз. Заказ № 1128. Цена свободная.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Российский университет дружбы народов»  
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Отпечатано в типографии ИПК РУДН  
Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3  
Тел.: +7 (495) 955-08-74; e-mail: [publishing@rudn.ru](mailto:publishing@rudn.ru)



## RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCHES

2021 Volume 22 Number 4

DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-4

<http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Founded in 2000

Founder: Peoples' Friendship University of Russia

---

### Editor-in-Chief

**Yury N. Razumny** – Professor, Director of the Academy of Engineering, Director of the Department of Mechanics and Mechatronics of the Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

### Associate Editor-in-Chief

**Sergey V. Reznik** – Professor, Head of the Department SM-13 “Composite Materials for Aerospace” of the Special Machinery Faculty, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

### Assistant to the Editor-in-Chief

**Svetlana V. Agasieva** – Associate Professor of the Department of Nanotechnology and Microsystem Engineering of the Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

### Editorial Board

**Brij Agrawal** – Professor, Naval Postgraduate School, Monterey, USA

**Oleg M. Alifanov** – Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Fabio Celani** – Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

**Rock Jeng-Shing Chern** – Professor, Ryerson University, Toronto, Canada

**Roberto Furfaro** – Professor, University of Arizona, Tucson, USA

**Paolo Gasbarri** – Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

**Giancarlo Genta** – Professor, Polytechnic University of Turin, Turin, Italia

**Ioannis Zois Gitas** – Professor, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

**Filippo Graziani** – Full Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

**Anna Guerman** – Professor, University of Beira Interior, Covilhã, Portugal

**Pini Gurfil** – Full Professor, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel

**Moriba Jah** – Associate Professor, University of Texas at Austin, Austin, USA

**Vladimir T. Kalugin** – Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

**Vladimir M. Kapustin** – Professor, National University of Oil and Gas “Gubkin University” (Gubkin University), Moscow, Russia

**Junichiro Kawaguchi** – Professor, Japan Aerospace Exploration Agency, Tokyo, Japan

**Nikolay B. Kuznetsov** – Professor, Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Richard Linares** – Professor, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA

**Maxim M. Matyushin** – Dr. (Technical Sciences), JSC “Central Research Institute for Machine Building” (JSC “TsNIMMash”), Korolev, Russia

**Andrey V. Medvedev** – Dr. (Physical and Mathematical Sciences), corresponding member of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Institute of Solar-Terrestrial Physics, Irkutsk, Russia

**Arun Misra** – Professor, McGill University, Montreal, Canada

**Seidu O. Mohammed** – Professor, National Space Research and Development Agency, Abuja, Nigeria

**Daniele Mortari** – Professor, Texas A&M University, College Station, USA

**Giovanni Palmerini** – Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

**Vyacheslav G. Petukhov** – Dr. (Technical Sciences), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

**Yury S. Popkov** – Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Harri A. Popov** – member of the Russian Academy of Sciences, Professor, Director of the Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Antonio Prado** – Professor, National Institute for Space Research, Sao Jose dos Campos, Brazil

**Ivan Y. Redko** – Professor, JSC “Krzhizhanovsky Energy Institute”, Moscow, Russia

**David B. Spencer** – Professor, Pennsylvania State University, University Park, USA

**Renuganth Varatharajoo** – Professor, University Putra Malaysia, Seri Kembangan, Malaysia

**Massimiliano L. Vasile** – Professor, University of Strathclyde, Glasgow, United Kingdom

**Antonio Viviani** – Professor, University of Campania Luigi Vanvitelli, Naples, Italy

**Tetsuo Yasaka** – Professor Emeritus, Kyushu University, Fukuoka, Japan

**RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCHES**  
**Published by the Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)**

**ISSN 2312-8143 (Print); ISSN 2312-8151 (Online)**

Publication frequency: quarterly.

Journal homepage: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> (Open Access).

Languages: Russian, English.

Indexed by Russian Index of Science Citation, DOAJ, Ulrich's Periodicals Directory, Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, East View, Dimensions, EBSCOhost.

### **Aims and Scope**

The RUDN Journal of Engineering Researches – is a peer-reviewed international academic journal publishing research in the field of computer science, computer engineering and control, aviation and space technology, earth sciences. The journal is international in terms of the composition of the editorial board, authors and topics of publications. The journal publishes the results of original scientific research by Russian and foreign scientists.

The aims of the journal:

- assistance in the development of Russian and foreign engineering schools;
- promotion and implementation into practice of modern advanced technologies in these areas;
- scientific exchange and collaboration between scientists.

The journal is addressed to researchers, engineers, graduate students. Included in the List of the Leading Scientific Journals and Editions of the Highest Certification Committee of the Ministry of Education and Science of Russian Federation in which the basic results of PhD and Doctoral theses are to be published.

The journal website operates on the Portal of RUDN University scientific journals <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> and contains full information about the journal, editorial policy and ethics, requirements for the preparation and publication of the articles, as well as full-text issues of the journal since 2008 (Open Access).

Editorial Board strictly adheres to the international standards of publication ethics of the COPE: <http://publicationethics.org>

---

Copy Editor *Iu.A. Zaikina*  
Layout Designer *Iu.A. Zaikina*

**Address of the editorial board:**

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation  
Ph.: +7 (495) 955-07-16; e-mail: [publishing@rudn.ru](mailto:publishing@rudn.ru)

**Address of the editorial board of RUDN Journal of Engineering Researches:**

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation  
Ph.: +7 (495) 955-07-92; e-mail: [engj@rudn.ru](mailto:engj@rudn.ru)

---

Printing run 500 copies. Open price.

Peoples' Friendship University of Russia  
6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

**Printed at RUDN Publishing House:**

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation  
Ph.: +7 (495) 955-08-74; e-mail: [publishing@rudn.ru](mailto:publishing@rudn.ru)

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Карневич В.В.</b> Гидродинамические поверхности с мидель-шпангоутом в форме кривых Ламе .....	323
<b>Телков О.И., Космачева А.Д., Ходяков А.А., Хлопков С.В., Данилов И.К.</b> Анализ свойств антифризов до и после их эксплуатации в двигателе внутреннего сгорания .....	329
<b>Антипов Ю.А., Шаталова И.И., Шкарин К.В., Лапин М.В., Соколов Д.А., Гринин А.О., Топтыгин К.П.</b> Особенности моделирования высокоэффективной многоступенчатой парокompрессионной теплонасосной установки .....	339
<b>Борисов И.М., Резник С.В.</b> Разработка композитной конструкции биомеханического назначения .....	348
<b>Володин А.Б., Преснов С.В., Якунчиков В.В.</b> На пути к автономному судоходству .....	355
<b>Юницкий А.Э., Пронкевич С.А., Артюшевский С.В., Лукша В.Л.</b> Общепланетарное транспортное средство и космическое ожерелье «Орбита» как альтернатива ракетному освоению околоземного пространства .....	364

## CONTENTS

<b>Karnevich V.V.</b> Hydrodynamic surfaces with midsection in the form of Lamé curve .....	323
<b>Telkov O.I., Kosmacheva A.D., Khodyakov A.A., Khlopkov S.V., Danilov I.K.</b> Analysis of antifreeze properties before and after their operation in engine .....	329
<b>Antipov Yu.A., Shatalova I.I., Shkarin K.V., Lapin M.V., Sokolov D.A., Grinin A.O., Toptygin K.P.</b> Features of modeling a highly efficient multistage vapor compression heat pump unit .....	339
<b>Borisov I.M., Reznik S.V.</b> Development of a composite structure for biomechanical purposes .....	348
<b>Volodin A.B., Presnov S.V., Yakunchikov V.V.</b> On the way to autonomous navigation .....	355
<b>Unitsky A.E., Pronkevich S.A., Artyushevsky S.V., Looksha V.V.</b> General planetary vehicle and industrial space necklace “Orbit” as an alternative to rocket near space exploration .....	364



DOI 10.22363/2312-8143-2021-22-4-323-328  
UDC 629.5.083.5

Research article / Научная статья

## Hydrodynamic surfaces with midsection in the form of Lamé curve

Valery V. Karnevich

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

✉ valera.karnevich@gmail.com

### Article history

Received: August 25, 2021

Revised: October 11, 2021

Accepted: November 1, 2021

### Keywords:

ship surface, midsection, Lamé curve,  
hydrodynamic surface, algebraic surface

**Abstract.** General representation of ship geometry is given by the method of slicing the ship hull by three mutually perpendicular planes: vertical symmetry plane which runs along the middle of hull width, horizontal plane which divides the hull into underwater and above-water parts, and vertical plane perpendicular to the other two which coincides with midsection. By taking the same three predefined sections of the theoretical hull shape, it is possible to obtain three algebraic surfaces of different order, which are called hydrodynamic in this article. By introducing alphabetic parameters to signify orders of ship skeleton main curves and then by giving them various numerical values, it is possible to consider a large number of hull shapes, having only three explicit surface equations. Method of deriving the equations, obtained by other authors, using only three explicit algebraic equations is demonstrated. The proposed technique is illustrated on six new ship hull shapes.

### For citation

Karnevich V.V. Hydrodynamic surfaces with midsection in the form of Lamé curve. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(4):323–328. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-4-323-328>

## Гидродинамические поверхности с мидель-шпангоутом в форме кривых Ламе

В.В. Карневич

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

✉ valera.karnevich@gmail.com

### История статьи

Поступила в редакцию: 25 августа 2021 г.

Доработана: 11 октября 2021 г.

Принята к публикации: 1 ноября 2021 г.

### Ключевые слова:

судовая поверхность, мидель-шпангоут,  
кривые Ламе, гидродинамическая по-  
верхность, алгебраическая поверхность

**Аннотация.** Общее представление о геометрических характеристиках формы корпуса судна дает метод сечения корпуса тремя взаимно перпендикулярными плоскостями, а именно вертикальной плоскостью симметрии, проходящей вдоль корпуса посередине ее ширины, горизонтальной плоскостью, делящей судно на надводную и подводную части, и вертикальной плоскостью, перпендикулярной первым двум и совпадающей с мидель-шпангоутом. Имея одну и ту же тройку наперед заданных плоских сечений теоретической формы судна этими плоскостями, можно получить три алгебраические поверхности разного по-

© Karnevich V.V., 2021



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

рядка, названные в статье гидродинамическими. Вводя буквенные показатели степеней главных плоских кривых каркаса судна, а затем давая им разные цифровые значения, можно ввести в рассмотрение большое количество форм корпусов при наличии лишь трех явных уравнений поверхностей. Продемонстрировано, как получить уравнения, представленные другими авторами, используя только три явных алгебраических уравнения, описанные в статье. Предложенная методика проиллюстрирована на шести новых формах корпусов судов.

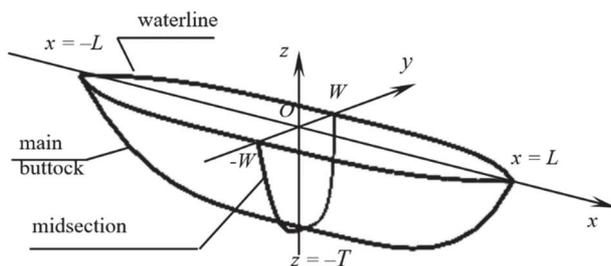
**Для цитирования**

Карневич В.В. Гидродинамические поверхности с мидель-шпангоутом в форме кривых Ламе // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 4. С. 323–328. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-4-323-328>

**Introduction**

Choosing the outline of ship hull surface is one of the main problems of naval architects. A number of factors has to be considered. Often the hull shape is chosen based on designer intuition or with the help of empirical formulas or substantially expensive full-scale experiments [1]. Authors [2] recommend to conduct experiments on the models after selecting theoretical hull shape for optimization of ship geometric dimensions with regards to its mobility, decreasing water resistance and other navigational features. It was pointed out that the best sample was selected from 496 options. There are articles, for example, [3] and [4], which consider applied problems concerned with the capabilities of COMPAS-3D CAD program in geometric modelling of ship hull shapes. Such papers investigate methods of modelling hulls based on plane curves.

Some insight about modern cargo ship hull shapes for Russian river fleet can be gathered from the article by G.V. Egorov [5]. According to some sources that there 11 types of ships, and for each one there have been published a large number of research papers devoted to requirements on optimal shapes of the corresponding ships [6].



**Figure 1.** Hydrodynamic surface skeleton consisting of three plane curves

Some designers show that for the purpose of generating optimal form of ship hull, algebraic surfaces with predefined skeleton consisting of three plane curves, lying in mutually perpendicular cross-sections of the ship, are quite suitable (Figure 1). By having three plane curves coinciding with the midsection (*yOz* plane), main buttock (*xOz* plane), and waterline (*xOy* plane), one can construct three different algebraic surfaces [7]. One of them may be taken as the hull shape in the first approximation, then a cylindrical section may be inserted. Alternatively, the hull shape may consist of two different algebraic surfaces, where the bow and stern parts of the ship are joined smoothly at the midsection.

The obtained surfaces are called algebraic in certain papers [8], in others – hydro/aerodynamic [9], and sometimes simply hydrodynamic [7]. In this article, similarly to [7], the surfaces are named hydrodynamic with predefined waterline, midsection and buttock line.

**Hydrodynamic surfaces with parabola of order *t*, Lamé curve and parabola of order *k***

Thus, we have the waterline in the form of parabola of order *t*:

$$y = \pm W \left( 1 - \frac{x^t}{L^t} \right), \tag{1}$$

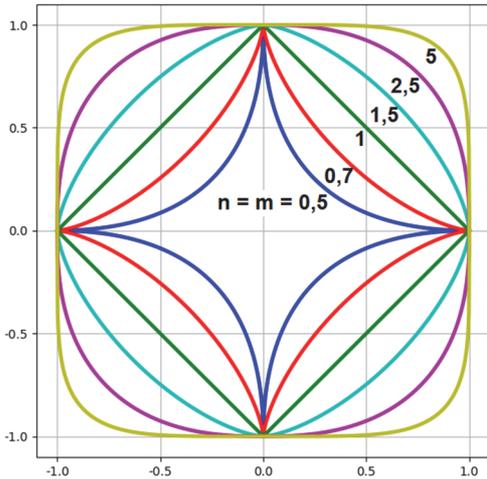
midsection in the form of Lamé curve:

$$|z|^n = T^n \left( 1 - \frac{|y|^m}{W^m} \right), \tag{2}$$

main buttock in the form of parabola of order *k*:

$$z = -T \left( 1 - \frac{x^k}{L^k} \right). \tag{3}$$

Taking the hull skeleton shape constructed from the three plane curves (Figure 1) by equations (1)–(3) allows to obtain the required formulas for a number of hull shapes owing to arbitrary powers  $t, n, m, k$ . For example, by plugging different values into parameters  $n$  and  $m$  in formula (2), we obtain different outlines of midsections (Figure 2).



**Figure 2.** Lamé curves at different values of parameters  $n = m = 0.5, 0.7, 1, 1.5, 2.5, 5$

It is assumed that the main geometric parameters of the ship are defined as:  $T$  – hull draft,  $2W$  – hull width,  $2L$  – hull length (Figure 1).

Let us consider a section of hydrodynamic surface on  $z = \text{const}$  plane. Its equation is derived similarly to (1):

$$y = \pm W(z) \left( 1 - \frac{x^t}{L(z)^t} \right), \quad (4)$$

where  $L(z)$  – is  $x$  from formula (3):

$$L(z) = L^k \sqrt[1 + \frac{z}{T}]{}^k,$$

and  $W(z)$  – is  $y$  from formula (2), therefore

$$W(z) = W^m \sqrt[1 - \frac{|z|^n}{T^n}]{}^m.$$

Plugging the previous two expressions into formula (4), we obtain

$$y = \pm W^m \sqrt[1 - \frac{|z|^n}{T^n}]{}^m \left[ 1 - \frac{x^t}{L^t (1 + z/T)^{t/k}} \right]. \quad (5)$$

Equation (5) is the equation of the first hydrodynamic surface of interest.

Let us rewrite this equation in parametric form by taking

$$z = z(u) = -uT, \quad x = x(u, v) = vL^k \sqrt{1 - u},$$

$$y = y(u, v) = \pm W^m \sqrt{1 - u^n} (1 - |v|^t), \quad (6)$$

where  $0 \leq u \leq 1$ ;  $-1 \leq v \leq 1$ ;  $t, k, n, m$  – are positive numbers.

To obtain the second hydrodynamic surface with main skeleton (1)–(3), but constructed by the envelope of sections in  $x = \text{const}$  plane, we take

$$|z|^n = T(x)^n \left( 1 - \frac{|y|^m}{W(x)^m} \right), \quad (7)$$

where from formula (1)

$$W(x) = W \left( 1 - \frac{x^t}{L^t} \right),$$

from formula (3)

$$T(x) = -T \left( 1 - \frac{x^k}{L^k} \right).$$

Plugging in the last two expressions into (7), we obtain

$$|z|^n = T^n \left( 1 - \frac{x^k}{L^k} \right)^n \left[ 1 - \frac{|y|^m}{W^m \left( 1 - \frac{x^t}{L^t} \right)^m} \right]. \quad (8)$$

Equation (8) is the algebraic equation of the second hydrodynamic surface of interest. Parametric equations for the second surface are

$$x = x(u) = uL, \quad y = y(u, v) = vW(1 - u^t),$$

$$|z|^n = |z(u, v)|^n = -T^n (1 - u^k)^n (1 - v^m), \quad (9)$$

where  $-1 \leq u \leq 1$ ;  $-1 \leq v \leq 1$ ;  $t, k, n, m$  – are positive numbers.

The third hydrodynamic surface is formed by sections in  $y = \text{const}$  plane, thus, according to formula (3),

$$z = -T(y) \left( 1 - \frac{x^k}{L(y)^k} \right), \quad (9)$$

where from formula (2)

$$T(y) = T^n \sqrt[1 - \frac{|y|^m}{W^m}]{}^n$$

and from formula (1)

$$L(y) = L \sqrt[t]{1 \mp \frac{y}{W}}.$$

Plugging in the last two expressions into (9), we get

$$z = -T^n \sqrt[n]{1 - \frac{|y|^m}{W^m}} \left[ 1 - \frac{x^k}{L^k \left(1 \mp \frac{y}{W}\right)^{k/t}} \right]. \quad (10)$$

Parametric equations for the third hydrodynamic surface are:

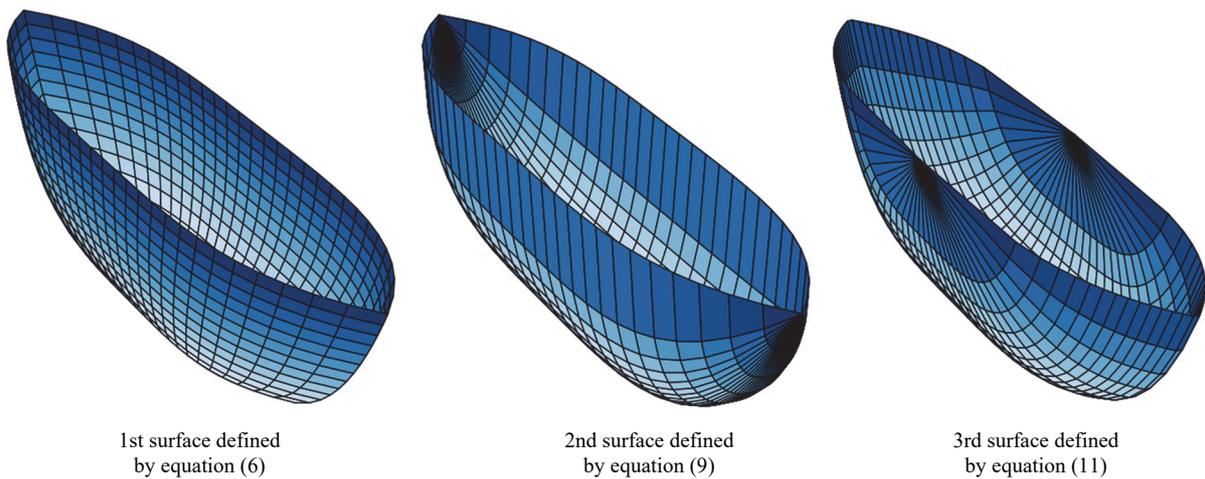
$$y = y(u) = uW,$$

$$x = x(u, v) = vL \sqrt[t]{1 \mp u},$$

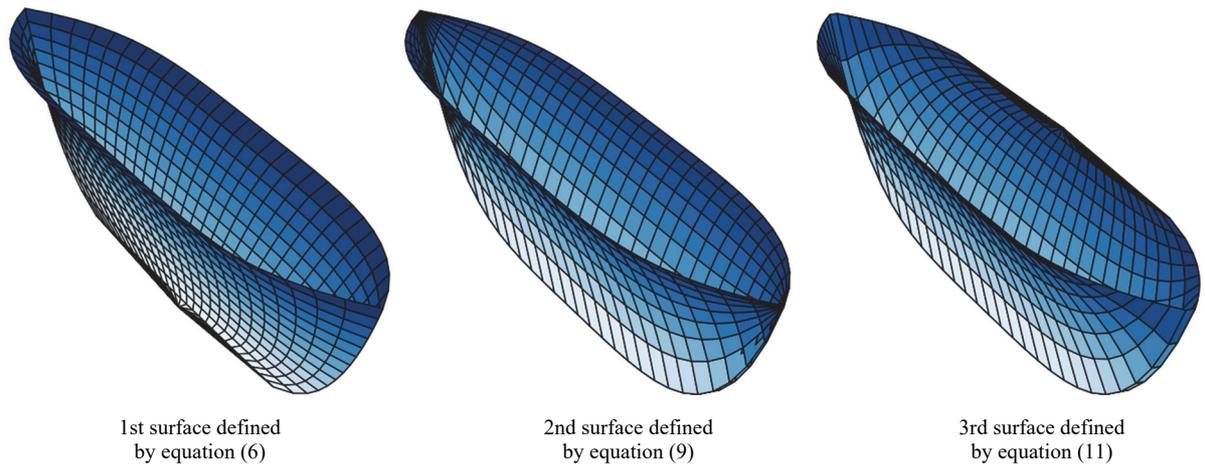
$$z = z(u, v) = -T^n \sqrt[n]{1 - |u|^m} (1 - v^k), \quad (11)$$

where  $-1 \leq u \leq 1$ ;  $-1 \leq v \leq 1$ ;  $t, k, n, m$  – positive numbers.

**Example 1.** The three hydrodynamic surfaces defined by equations (6), (9), (11) are rendered taking  $t=4, m=n=5/2, k=4$ . In this case the midsection is in the form of Piet Hein’s superellipse. All three hydrodynamic surfaces are shown on Figure 3.



**Figure 3.** Three hydrodynamic surfaces with  $T = 1$  m,  $W = 0.5$  m,  $L = 5$  m



**Figure 4.** Three hydrodynamic surfaces with  $T = 1$  m,  $W = 0.5$  m,  $L = 5$  m

**Example 2.** Let us render the three hydrodynamic surfaces defined by equations (6), (9), (11) taking  $t = 4$ ;  $m = n = 0,7$ ;  $k = 4$ . All three hydrodynamic surfaces are shown on Figure 4.

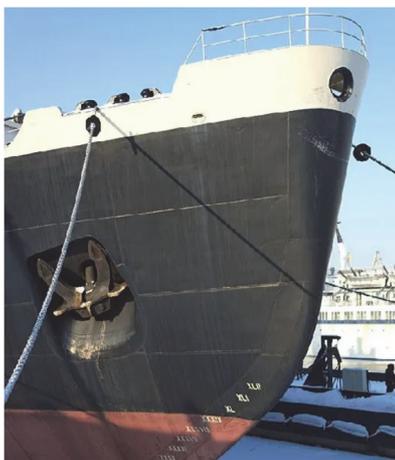
## Results

Plane curves (1)–(3), which coincide with the main skeleton of the ship, describe a large number of plane algebraic curves and allow to construct numerous groups of three hydrodynamic surfaces. Figures 3 and 4 show hydrodynamic surfaces with convex (Figure 3) and concave (Figure 4) midsections. The groups of three surfaces are rendered with the help of Matplotlib plotting library in Python programming language.

Previously, each hydrodynamic surface used to be constructed for predefined curves (1)–(3) separately. For example, encyclopedia [10] presents hydrodynamic surfaces for  $t = k = m = 4$ ,  $n = 1$  case and  $t = k = 4$ ,  $n = 2$ ,  $m = 1/3$  case. Explicit and parametric equations for two groups of three hydrodynamic surfaces for  $t = m = n = k = 2$  and for  $t = 2$ ,  $m = k = 4$ ,  $n = 1$  are derived in article [7]. Several surfaces are considered in papers [9; 11].

## Discussion

Hydrodynamic surfaces with the skeleton from predefined plane algebraic curves cannot have Gaussian curvature equal to zero, i.e. cannot be developable surfaces. They will need to be approximated when applying sheet metal to the hull, that is the hull designed at the first stage will need to be replaced by the hull from developable surface sheets (Figure 5).



**Figure 5.** Replacing theoretical hull shape with developable surface sheets

Considering that ship mobility is affected mostly by the outline of the waterlines, the approximated developable surface needs to be preferably constructed as a surface on two sections in  $z = \text{const}$  plane [12]. These sections will lie in the planes parallel to the waterline plane (1). Approximation may not be needed, if the hull is made of composite materials. Some useful suggestions on geometric modelling of ships hulls can be found in [13]. H. Tober [14] studied the influence of ship hull geometry on water resistance in motion. However, the author considered merely geometrical problems of hull design.

## Conclusion

Since the hull of a real ship has very complex form and depends on many factors, the results presented in this article can only be applied at the early stage of ship hull design. Analytical method of hull shape definition, as opposed to the graphical one, will allow to extensively apply computer modelling, for which it is quite easy to implement a program accounting even for cylindrical insertions.

## References

1. Doctors LJ. Optimization of marine vessels on the basis of tests on model series. *J. Mar. Sci. Technol.* 2020;25:887–900. <https://doi.org/10.1007/s00773-019-00687-4>
2. Deng R, Wang S, Hu Y, Wang Y, Wu T. The effect of hull form parameters on the hydrodynamic performance of a bulk carrier. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021;9:373. <https://doi.org/10.3390/jmse9040373>
3. Goravneva T, Semenova-Tyan-Shanskaya V. Modelling ship hull with application of SAPR KOMPAS 3D. *SAPR and Graphics.* 2019;4:57–61.
4. Rychenkova AYu, Klimenko ES, Borodina LN. Geometric modeling and quality assessment of the hull frame surface in COMPASS-3D CAD. *Russian Journal of Water Transport.* 2020;62:71–90. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.49>
5. Yegorov GV. Justification for construction of container carries for Russian water transport. *Shipbuilding.* 2021;(3):9–24. (In Russ.)
6. Tupper Eric C. Ship types (chapter 15). *Introduction to Naval Architecture.* Amsterdam: Elsevier Ltd.; 2013. p. 379–412. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098237-3.00015-1>
7. Krivoshapko SN. Hydrodynamic surfaces. *Shipbuilding.* 2021;(3):64–67. (In Russ.)
8. Avdonev EYa, Protodyakonov SM. Research of geometry of some surfaces of the highest orders. *Prikladnaya Geometriya i Inzhenernaya Grafika.* 1975;20:138–142. (In Russ.)

9. Krivoshapko SN. On aero-hydro-dynamical surfaces given by algebraic plane curves. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2010;(2):3–4 (In Russ.).

10. Krivoshapko SN, Ivanov VN. Analytical surfaces for ship hulls. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(3):283–292. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-3-283-292>

11. Avdonev EYa. Analytical description of the ship hull surfaces. *Prikladnaya Geometriya i Inzhenernaya Grafika*. 1972;15:156–160. (In Russ.)

12. Krivoshapko SN. Application of tangential developable surfaces in shipbuilding. *Shipbuilding*. 1983;(7): 5–7 (In Russ.)

13. Ko KH. A survey: application of geometric modeling techniques to ship modeling and design. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2010;2(4):177–184. <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0034>

14. Tober H. *Evaluation of drag estimation methods for ship hulls*. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, School of Engineering Sciences; 2020.

#### **About the author**

*Valery V. Karnevich*, PhD student, Department of Civil Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-6232-2676, eLIBRARY SPIN-code: 4233-3099. E-mail: [valera.karnevich@gmail.com](mailto:valera.karnevich@gmail.com)



DOI 10.22363/2312-8143-2021-22-4-329-338  
УДК 62-713.3

Научная статья / Research article

## Анализ свойств антифризов до и после их эксплуатации в двигателе внутреннего сгорания

О.И. Телков<sup>✉</sup>, А.Д. Космачева, А.А. Ходяков<sup>ID</sup>, С.В. Хлопков<sup>ID</sup>, И.К. Данилов<sup>ID</sup>

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

✉ 1032202136@rudn.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 12 августа 2021 г.  
Доработана: 10 сентября 2021 г.  
Принята к публикации: 25 сентября 2021 г.

### Ключевые слова:

антифриз, моноэтиленгликоль, вязкость, плотность, водородный показатель, электропроводность, полиномиальная модель, полный факторный эксперимент

**Аннотация.** Представлены результаты диагностики показателей антифризов до и после их эксплуатации в двигателе внутреннего сгорания. Выбранное направление исследования актуально, так как позволяет прогнозировать не только изменение свойств антифриза в процессе его эксплуатации, но и получить свидетельства о протекании процессов коррозии металлов. Цель исследования – проведение контрольных испытаний антифризов до и после их эксплуатации в двигателе внутреннего сгорания, обеспечивающих поддержание силового агрегата в исправном состоянии. Объектами исследования были свежий антифриз AGAZ-40-G12++ (2021 года выпуска; А-21) и охлаждающая жидкость AGAZ-40-G12+ (2012 года выпуска; АЭ-12) после ее эксплуатации в течение нескольких лет. Показано, что водородный показатель, плотность, вязкость, электропроводность проб охлаждающей жидкости до и после ее эксплуатации различны. Установлено, что ход зависимостей электропроводности  $\sigma$  от температуры  $t$  для образцов А-21 и АЭ-12 одинаков. Зависимость  $\sigma$  от  $t$  описывается полиномиальной (квадратичной) моделью. Сделано предположение, что более высокие значения водородного показателя АЭ-12 могут свидетельствовать о протекании электрохимической коррозии металлов, которые в процессе контакта с антифризом образуют короткозамкнутые гальванические пары. С помощью проведенного полного факторного эксперимента продемонстрировано, что более высокие значения рН бывшего в эксплуатации антифриза могут быть отражением деградации свойств моноэтиленгликоля и протекающих процессов коррозии металлов.

### Для цитирования

Телков О.И., Космачева А.Д., Ходяков А.А., Хлопков С.В., Данилов И.К. Анализ свойств антифризов до и после их эксплуатации в двигателе внутреннего сгорания // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 4. С. 329–338. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-4-329-338>



## Analysis of antifreeze properties before and after their operation in engine

Oleg I. Telkov<sup>✉</sup>, Anastasia D. Kosmacheva,  
Aleksandr A. Khodyakov<sup>ID</sup>, Sergey V. Khlopkov<sup>ID</sup>, Igor K. Danilov<sup>ID</sup>

*Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia*

✉ 1032202136@rudn.ru

### Article history

Received: August 12, 2021

Revised: September 10, 2021

Accepted: September 25, 2021

### Keywords:

antifreeze, monoethylene glycol, viscosity, density, pH, electrical conductivity, polynomial model, full factorial experiment

**Abstract.** The results of diagnostics of antifreeze indicators before and after their operation in an internal combustion engine are presented. The chosen direction of research is relevant, since it allows one to predict not only the change in the properties of antifreeze during its operation, but also to obtain evidence of the course of metal corrosion processes. The purpose of the study – to conduct control tests of antifreezes before and after their operation in an internal combustion engine, that ensures the maintenance of the power unit in good condition. The objects of study were fresh AGA Z-40-G12++ antifreeze (release of 2021; A-21) and coolant AGA Z-40-G12+ (release of 2012; AE-12) after its operation for several years. It is shown that the pH, density, viscosity, electrical conductivity of the coolant samples before and after its operation are different. It was found that the course of the dependences of electrical conductivity  $\sigma$  on temperature  $t$  for samples A-21 and AE-12 is the same. The dependence of  $\sigma$  on  $t$  is described by a polynomial (quadratic) model. It has been suggested that higher values of the AE-12 hydrogen index may indicate the occurrence of electrochemical corrosion of metals, which, in the process of contact with antifreeze, form short-circuited galvanic pairs. With the help of a complete factorial experiment, it was demonstrated that higher pH values of used antifreeze can be a reflection of the degradation of the properties of monoethylene glycol and the ongoing processes of metal corrosion.

### For citation

Telkov OI, Kosmacheva AD, Khodyakov AA, Khlopkov SV, Danilov IK. Analysis of antifreeze properties before and after their operation in engine. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(4):329–338. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-4-329-338>

### Введение

Известно, что большое число неисправностей автомобилей, требующих затрат на диагностику и дорогостоящий ремонт, связано с отказами элементов системы охлаждения, которые могут привести не только к изменению теплового режима работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС), но и перегреву силового агрегата. Так, например, отказ термостата (терморегулятора), который относится к невосстанавливаемым изделиям, может повлечь нарушение геометрии головки блока цилиндров. Работа двигателя связана не только с исправностью применяемых для охлаждения устройств, но и со свойствами применяемого для охлаждения двигателя хладагента, с деградацией его свойств.

В качестве хладагента в современных силовых агрегатах используют антифризы – жидкости, в которых кроме моноэтиленгликоля (основной компонент) присутствуют и различного рода присадки<sup>1</sup> [1–5]. Современные охлаждающие жидкости из-за сложности их состава выполняют функции, присущие моторным маслам и смазочно-охлаждающим жидкостям. Охлаждающие жидкости в настоящее время делят (классифицируются) на традиционные, гибридные, карбоксилатные и лобридные антифризы.

Антифризы, так же как и другие эксплуатационные материалы, должны обеспечивать на-

<sup>1</sup> Межгосударственный стандарт. Жидкости охлаждающие низкотемпературные. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2007. 14 с.

дежность и долговечность транспортных средств. Поэтому контроль показателей антифриза до и после его эксплуатации является мероприятием, проведение которого в итоге может явиться одним из важнейших факторов, обеспечивающих исправное состояние автомобилей. Следует отметить, что разработка рецептур антифризов с улучшенными эксплуатационными свойствами не теряет своей актуальности [5]. Это связано со сложностью современных систем охлаждения, заключающейся в применении при их изготовлении разных по природе конструкционных материалов.

### Экспериментальная часть

Объектами исследования были антифризы AGAZ-40-G12++ (2021 года выпуска; А-21) и AGAZ-40-G12+ (2012 года выпуска; АЭ-12) после его эксплуатации в течение нескольких лет в ДВС.

Для измерения водородного показателя (рН) антифризов использовали рН-метр 5170. Измерения (при температуре 20 °С) проводили с помощью стеклянного электрода. Калибровку устройства регистрации водородного показателя осуществляли, применяя в качестве эталонов стандартные буферные растворы с рН 3,57; 4,00; 5,00; 6,88; 9,22. Погрешность измерения водородного показателя  $\pm 0,05$  рН.

Удельную электропроводность  $\sigma$  проб антифризов измеряли прибором СОМ 100 (диапазон измерения электропроводности 0–9990 мкСм·см<sup>-1</sup>, погрешность измерения  $\pm 2$  %). При измерении  $\sigma$  охлаждающую жидкость с помощью магнитной мешалки подвергали перемешиванию.

Измерение рН и удельной электропроводности проб антифризов проводили в стеклянных химических стаканах емкостью 50 мл. Минимальный объем жидкости, помещаемой в измерительную емкость, составлял 20 мл. Измеряли не только рН и  $\sigma$  исходных образцов антифризов, но разбавленных дистиллированной водой проб жидкостей.

Массу жидкостей, а также необходимых для проведения исследований материалов измеряли на лабораторных весах ВЛТЭ-150 (II класс точности, ГОСТ 24104–2001). Наименьший предел взвешивания ВЛТЭ-150 составляет 0,02 г. Предел погрешности весов при интервале взвешивания от 0,02 до 50 г равен  $\pm 3$  мг, среднеквадратическое отклонение показаний весов не более 1,5 мг.

Плотность антифризов измеряли с помощью денсиметров. По величине измеренной плотности, используя табличные данные, определяли процентное содержание в антифризах моноэтиленгликоля (МЭГ).

Кинематическую вязкость проб антифризов определяли (в интервале температур от 20 до 100 °С) вискозиметрами ВПЖ-4.

Расчет вязкости  $\nu$ , сСт, проводили по уравнению

$$\nu = C\tau, \quad (1)$$

где  $C$  – постоянная вискозиметра, сСт·с<sup>-1</sup>;  $\tau$  – среднеарифметическое время истечения проб жидкостей, сек.

### Результаты и обсуждение

Измерение водородного показателя антифризов проводили в соответствии с ГОСТом, где указано, что рабочие охлаждающие жидкости ОЖ-65 и ОЖ-40 испытывают без разбавления<sup>2</sup>. Антифриз АЭ-12 с содержанием МЭГ 97,8 % перед измерением рН разбавляли дистиллированной водой таким образом, чтобы концентрация моноэтиленгликоля была около 50 %.

Статистико-математическую обработку данных проводили с помощью статистических функций и надстроек «Пакет анализа», «Поиск решения» табличного процессора Microsoft Office Excel [6; 7].

Для определения числа повторных измерений параметров рН и  $\sigma$  были проведены 4-кратные измерения водородного показателя и электропроводности антифриза Л-40. Далее, используя рассчитанные значения стандартного отклонения и величину требуемой точности результата измерения рН, вычисляли минимальное число необходимых измерений (количество повторных опытов) [8]:

$$n \geq \frac{t_{\gamma}^2 s_{\text{рН}}^2}{\varepsilon^2}, \quad (2)$$

где  $t_{\gamma}$  – критерий Стьюдента, определяемый с помощью функции «СТЮДРАСПОБР» (уровень значимости 0,05, число проведенных опытов 4);  $s_{\text{рН}}$  – стандартное отклонение;  $\varepsilon$  – требуемая точность измерения рН ( $\varepsilon = \pm 0,05$  рН).

<sup>2</sup> Межгосударственный стандарт. Жидкости охлаждающие низкотемпературные. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2007. 14 с.

Минимальное число измерений электропроводности рассчитывали по формуле

$$n = \frac{t_{\gamma}^2 \omega^2}{\varepsilon^2}, \quad (3)$$

где  $t_{\gamma}$  – коэффициент, зависящий от доверительной вероятности  $\gamma$  (аналогичный коэффициент Стьюдента только при  $n = \infty$ );  $\omega$  – коэффициент вариации;  $\varepsilon$  – относительная погрешность вычисления случайной величины (требуемая точность результата  $\varepsilon = \pm 2\%$ ).

В результате проведенных расчетов установлено, что число повторных испытаний для требуемых точностей составило  $\sim 1,3$ – $1,5$  измерений. При таких значениях  $n$  посчитали, что целесообразно проводить по одному измерению как pH, так и  $\sigma$ .

В табл. 1 приведены плотность, содержание МЭГ в пробах, водородный показатель, электропроводность и вязкость взятых для анализа антифризов.

Таблица 1

**Плотность  $\rho$  антифризов, содержание  $C$  в пробах моноэтиленгликоля, pH, электропроводность и вязкость  $\nu$  охлаждающих жидкостей**

Анти-фриз	Показатель				
	$\rho$ , г·см <sup>-3</sup>	$C$ , %	pH	$\sigma^{**}$ , мкСм·см <sup>-1</sup>	$\nu$ , сСт
АЭ-12	1,114	97,8	8,56*	1770	9,5
А-21	1,070	52,6	8,06	1970	3,6

Примечание: \* – водородный показатель разбавленного раствора АЭ-12 (концентрация МЭГ  $\sim 50\%$ ); \*\* – электропроводность при 24,6 °С неразбавленных проб антифризов.

Table 1

**Density  $\rho$  of antifreezes, content  $C$  in samples of monoethylene glycol, pH, electrical conductivity and viscosity  $\nu$  of coolants**

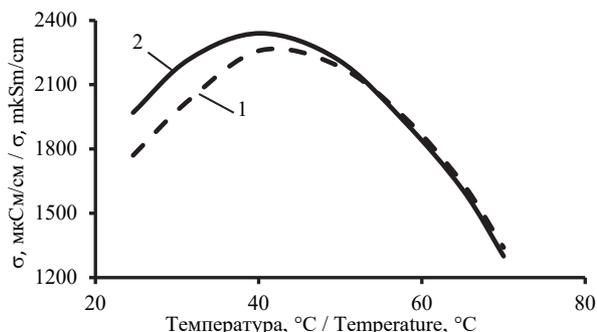
Anti-freeze	Index				
	$\rho$ , g·cm <sup>3</sup>	$C$ , %	pH	$\sigma^{**}$ , mkSm·cm <sup>-1</sup>	$\nu$ , cSt
AE-12	1.114	97.8	8.56*	1770	9.5
A-21	1.070	52.6	8.06	1970	3.6

Note: \* – pH of diluted AE-12 solution (MEG concentration  $\sim 50\%$ ); \*\* – electrical conductivity at 24.6 °C of undiluted antifreeze samples.

Из сопоставления данных (табл. 1) следует, что показатели проб охлаждающих жидкостей АЭ-12 и А-21 отличаются. Отличие pH жидкости, слитой из системы охлаждения двигателя, от водородного показателя свежего антифриза

наблюдается и в разбавленных дистиллированной водой образцах АЭ-12. Все это свидетельствует об изменении свойств бывшей в эксплуатации охлаждающей жидкости.

На рис. 1 представлены зависимости  $\sigma$  от температуры, а в табл. 2 уравнения регрессии, полученные аппроксимацией данных с помощью линии тренда, и величины достоверности аппроксимации – коэффициенты детерминации.



**Рис. 1.** Изменение электропроводности проб антифризов в зависимости от температуры:  
1 – АЭ-12; 2 – А-21

**Figure 1.** Change in electrical conductivity of antifreeze samples depending on temperature:  
1 – AE-12; 2 – A-21

Таблица 2

**Уравнения регрессии и величины достоверности аппроксимации  $R^2$**

По данным	Уравнение	$R^2$
АЭ-12	$\hat{y} = -1,3042x^2 + 113,68x - 237,7$	0,9962
А-21	$\hat{y} = -1,2196x^2 + 99,862x + 270,07$	0,9965

Table 2

**Regression equations and approximation confidence values  $R^2$**

Data	Equation	$R^2$
AE-12	$\hat{y} = -1.3042x^2 + 113.68x - 237.7$	0.9962
A-21	$\hat{y} = -1.2196x^2 + 99.862x + 270.07$	0.9965

Ход зависимостей  $\sigma$  от температуры для изученных проб АЭ-12 (97,8 % МЭГ) и А-21 ( $\sim 50\%$  МЭГ) одинаков (рис. 1). Однако сами значения электропроводности в АЭ-12 и А-21 отличаются при низких температурах (до 52 °С) и становятся идентичными при высоких температурах (больше 52 °С). Следовательно, электропроводность антифриза при характерных температурах (80–90 °С) охлаждающей жидкости в работающем двигателе

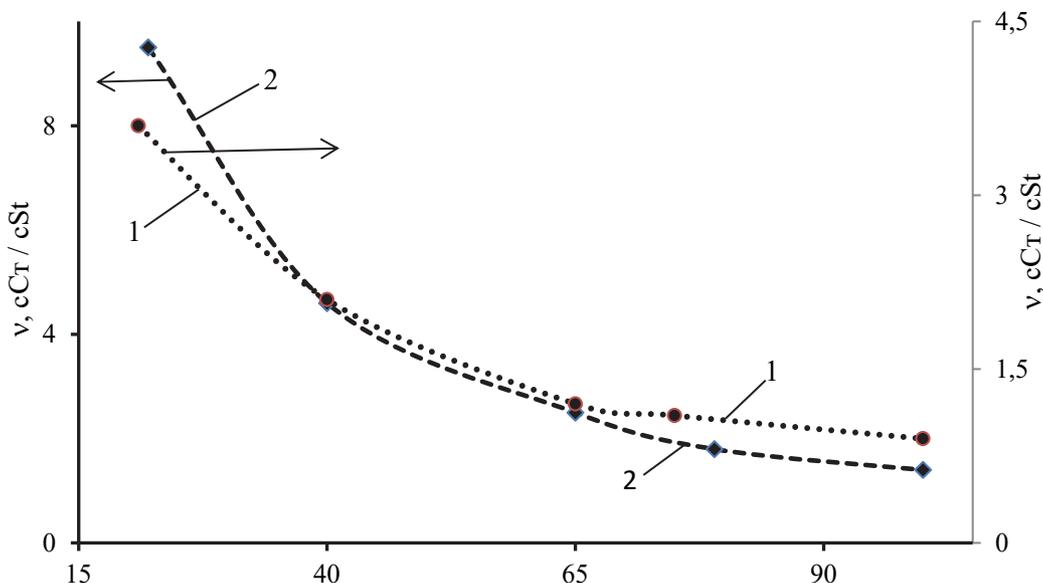
не зависит от содержания в охлаждающей жидкости моноэтиленгликоля.

Коэффициент детерминации показывает степень соответствия трендовой модели исходным данным. Чем ближе  $R^2$  к 1, тем точнее модель. Приведенные в табл. 2 значения коэффициентов детерминации свидетельствуют о высокой точности полиномиальной (квадратичной) модели, описывающей зависимость электропроводности от температуры охлаждающей жидкости.

Определение температур, соответствующих экстремальным значениям  $\sigma$ , проводили, исполь-

зуя надстройку «Поиск решения». Расчет показал, что экстремальное значение электропроводности для пробы АЭ-12 наблюдается при температуре 43,6 °С, для образца А-21 – 44,2 °С. Эти значения температуры с учетом погрешности ее измерения ( $\pm 1$  °С) одинаковы. Следовательно, различие в содержании моноэтиленгликоля в пробах никак не отражаются в величинах температур, при которых наблюдаются экстремумы электропроводности.

На рис. 2 представлено изменение вязкости антифризов в зависимости от температуры охлаждающей жидкости.



**Рис. 2.** Изменение вязкости антифризов в зависимости от температуры охлаждающей жидкости:  
1 – А-21; 2 – АЭ-12  
**Figure 2.** Change in the viscosity of antifreeze depending on the temperature of the coolant:  
1 – А-21; 2 – АЕ-12

Ход зависимости  $v$  от температуры независимо от содержания МЭГ представляет собой кривую линию (рис. 2). Значения вязкости проб АЭ-12 выше аналогичных параметров, регистрируемых в образцах А-21 в диапазоне температур от 20 до 100 °С (рис. 2, табл. 1).

Энергию активации вязкого течения  $E_a$  определяли, используя зависимость для установившегося процесса течения  $v$  от температуры – уравнение Френкеля – Андраде [9; 10]:

$$v = A \exp(E_a / RT), \quad (4)$$

где  $A$  – постоянная;  $E_a$  – энергия активации;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура.

Для определения  $E_a$  использовали значения вязкости, измеренные при температурах 20, 40, 65, 75–79 и 100 °С. Анализировали зависимость:

$$y = a + bx, \quad (5)$$

где  $y$  – логарифм вязкости  $\ln v$ ;  $a$  – свободный член;  $b$  – коэффициент регрессии, равный отношению  $E_a$  к  $R$ ;  $x$  – обратная абсолютная температура  $1/T$ .

Энергия активации вязкого течения составила 0,23 эВ (АЭ-12) и 0,16 эВ (А-21). Величина  $E_a$  – энергия активации молекулярного скачка представляет собой потенциальный барьер, который преодолевает молекула, двигаясь по вакансиям, находящимся в соседних слоях жидкости. Такое отличие значений  $E_a$  и величин вязкости позво-

ляет сделать прогноз о скорости прогрева двигателя и рабочих параметрах хладагента. Скорость прогрева двигателя может возрастать при охлаждении силового агрегата антифризом с большим содержанием МЭГ, а рабочие параметры жидкости (при 80–90 °С) из-за ее высокой вязкости отличаться от параметров антифризов с более низким содержанием моноэтиленгликоля.

Значения рН близких по содержанию моноэтиленгликоля жидкостей АЭ-12 и А-21 отличаются (табл. 1). Аналогичное отличие характерно и для величин  $\sigma$ . Удельная электропроводность

А-21 составила 1970 мкСм·см<sup>-1</sup>, АЭ-12 (с содержанием МЭГ ~ 50%) – 2960 мкСм·см<sup>-1</sup>. Более высокие значения рН в АЭ-12 могут свидетельствовать о протекании электрохимической коррозии металлов, которые в процессе контакта с антифризом образуют короткозамкнутые гальванические пары [11]. Для проверки того, что параметры рН бывшего в эксплуатации антифриза могут быть отражением деградации свойств этиленгликоля и протекающих процессов коррозии металлов, был поставлен полный факторный эксперимент (ПФЭ 2<sup>2</sup>) [12].

Таблица 3

Массы вносимых в пробы антифриза реагентов, измеренные значения водородного показателя

№ опыта	Вносимые в пробу реагенты, мг		рН <sub>А</sub>	рН <sub>Б</sub>
	Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	NaHCO <sub>3</sub>		
1	50	100	7,88	7,91
2	100	50	7,77	7,81
3	50	50	7,93	7,95
4	100	100	7,85	7,92

Table 3

Weights of reagents added to antifreeze samples, measured pH values

No of experiment	Reagents introduced into the sample, mg		pH <sub>A</sub>	pH <sub>B</sub>
	Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	NaHCO <sub>3</sub>		
1	50	100	7.88	7.91
2	100	50	7.77	7.81
3	50	50	7.93	7.95
4	100	100	7.85	7.92

Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	NaHCO <sub>3</sub>	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> *x <sub>2</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>ср</sub>	x <sub>1</sub> *y <sub>ср</sub>	x <sub>2</sub> *y <sub>ср</sub>	x <sub>1</sub> *x <sub>2</sub> *y <sub>ср</sub>	(y <sub>ср</sub> -y <sub>1</sub> ) <sup>2</sup>	(y <sub>ср</sub> -y <sub>2</sub> ) <sup>2</sup>	Σ
50	100	0	-1	1	-1	7,88	7,91	7,895	-7,895	7,895	-7,895	0,000225	0,000225	0,00045
100	50	0	1	-1	-1	7,77	7,81	7,79	7,79	-7,79	-7,79	0,0004	0,0004	0,0008
50	50	0	-1	-1	1	7,93	7,95	7,94	-7,94	-7,94	7,94	1E-04	0,0001	0,0002
100	100	0	1	1	1	7,85	7,92	7,885	7,885	7,885	7,885	0,001225	0,001225	0,00245
								31,51	-0,16	0,05	0,14			0,0039
														0,000975
														0,01104
b <sub>0</sub>	7,8775					0,000156								
b <sub>1</sub>	-0,04					0,000156								2,776445 t <sub>крит</sub>
b <sub>2</sub>	0,0125					0,000156								0,030651
b <sub>12</sub>	0,035					0,000156								
						0,000625								
						0,00125								
						1,282051 F <sub>расч</sub>								
						7,708647 F <sub>крит</sub>								
						y=7,4425+0,0016*x <sub>1</sub> -0,0042*x <sub>2</sub> +0,000056*x <sub>1</sub> *x <sub>2</sub>								

Рис. 3. Матрица планирования ПФЭ 2<sup>2</sup>, коэффициенты регрессии, расчет значимости коэффициентов, адекватности уравнения регрессии

Figure 3. Matrix for planning PFE 2<sup>2</sup>, regression coefficients, calculation of the significance of the coefficients, the adequacy of the regression equation

В ПФЭ использовали антифриз А-21, азотно-кислый свинец (Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) и гидрокарбонат натрия (NaHCO<sub>3</sub>). В водных растворах, взятых для проведения опытов реагентов, присутствует избыточное количество ионов водорода [H<sup>+</sup>] (Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)

и [OH<sup>-</sup>] (NaHCO<sub>3</sub>). Растворяясь в охлаждающей жидкости (водном растворе этиленгликоля), эти вещества должны оказывать влияние на водородный показатель антифриза. Появление в водном растворе этиленгликоля [H<sup>+</sup>] и [OH<sup>-</sup>] являет-

ся имитацией протекающих в системе охлаждения двигателя процессов коррозии металлов, моделированием процессов, приводящих к образованию в результате окисления моноэтиленгликоля кислоты, а также имитацией действия присутствующей в антифризах антикоррозионной щелочной присадки.

Таблица 4 / Table 4

**Коэффициенты уравнения регрессии /  
Coefficients of the regression equation**

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{1,2}$
7,8775	-0,04	0,0125	0,035

Уравнение регрессии в кодированных переменных

$$y = 7,8775 - 0,04x_1 + 0,0125x_2 + 0,035x_1x_2.$$

В результате проведенных в табличном процессоре Microsoft Office Excel расчетов установлено, что коэффициенты регрессии, за исключением  $b_2$ , статистически значимы. Уравнение регрессии в целом адекватно, то есть доля вариации, отнесенная за счет уравнения регрессии, больше, чем за счет случайных неучтенных факторов. Из-за отсутствия значимости одного из четырех коэффициентов регрессии полученная модель пригодна для принятия только некоторых решений, но не для прогнозов.

Уравнение регрессии в кодированных переменных с учетом того, что  $b_2 = 0$  приобретает вид

$$y = 7,8775 - 0,04x_1 + 0,035x_{1,2}.$$

После преобразования последнего выражения посредством перевода кодированных переменных в натуральные переменные получили уравнение

$$y = 7,4425 + 0,0016z_1 - 0,042z_2 + 0,000056z_1z_2. \quad (6)$$

Правильность выбранного набора факторов, интервала их варьирования, а также установления, соответствует ли точность использованного рН-метра решению поставленной задачи, проводили оценкой однородности дисперсий.

Гипотезу однородности (равенства) дисперсий проверяли с помощью критерия Кохрена. Использовали «Инструмент анализа», «Двухфакторный дисперсионный анализ без повторений» (рис. 4).

Расчетное значение критерия Кохрена  $G_{\text{расч}}$  составило 0,628205, критическое  $G_{\text{крит}} - 0,870901$ , то есть  $G_{\text{расч}} < G_{\text{крит}}$  (рис. 4). Следовательно, гипотеза об однородности дисперсий принимается и в повторении опытов нет необходимости.

Изменение свойств бывшего в эксплуатации антифриза АЭ-12 оценивали по соотношению (6). Расчет по представленному выражению должен дать ответ на вопрос: какое количество  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  и  $\text{NaHCO}_3$  необходимо поместить в охлаждающую жидкость, чтобы ее водородный показатель составил 8,56?

Двухфакторный дисперсионный анализ без повторений						
ИТОГИ	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия		
Строка 1	2	15,79	7,895	0,00045	0,016666667	
Строка 2	2	15,58	7,79	0,0008	13,49193338	
Строка 3	2	15,88	7,94	0,0002	0,870900555 $G_{\text{крит}}$	
Строка 4	2	15,77	7,885	0,00245		
				0,0039		
Столбец 1	4	31,43	7,8575	0,00449167	0,628205128 $G_{\text{расч}}$	
Столбец 2	4	31,59	7,8975	0,00369167		
Дисперсионный анализ						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	F критическое
Строки	0,02385	3	0,00795	34,0714286	0,008103422	9,276628154
Столбцы	0,0032	1	0,0032	13,7142857	0,03420018	10,12796448
Погрешность	0,0007	3	0,000233			
Итого	0,02775	7				

Рис. 4. Двухфакторный дисперсионный анализ без повторений

Two-way analysis of variance without repetitions							
Totals	Score	Sum	Average	Variance			
Line 1	2	15,79	7,895	0,00045		0,016667	
Line 2	2	15,58	7,79	0,0008		13,49193	
Line 3	2	15,88	7,94	0,0002		0,870901	G(critical)
Line 4	2	15,77	7,885	0,000245			
				0,0039			
Column 1	4	31,43	7,8575	0,004492		0,628205	G(estimated)
Column 2	4	31,59	7,8975	0,003692			
Analysis of variance							
Source of variation	SS	df	MS	F	P-value	t-critical	
Lines	0,02385	3	0,00795	34,07143	0,008103	9,276628	
Columns	0,0032	1	0,0032	13,71429	0,0342	10,12796	
Inaccuracies	0,0007	3	0,0000233				
Total	0,02775	7					

**Figure 4.** Two-way analysis of variance without repetitions

Для ответа на поставленный вопрос использовали надстройку «Поиск решения», где значение целевой функции приравнивали к 8,56. Показано, что суммарный вес реагентов составил 311–340 мг, что в 1,6–1,7 раза больше массы внесенных в антифриз A-21  $Pb(NO_3)_2$  и  $NaHCO_3$  (200 мг). Следовательно, величина pH бывшего в эксплуатации антифриза отражает не только изменение свойств охлаждающей жидкости, но и свидетельствует о протекании (при контакте хладагента с металлами) процессов коррозии.

## Заключение

Обобщая представленные результаты опытов и их обсуждение, следует сделать вывод о целесообразности контроля показателей свежего (исходного) антифриза (A-21) и жидкости после ее эксплуатации (AЭ-12) в бензиновом двигателе. Показано, что водородный показатель, плотность, вязкость, электропроводность проб охлаждающих жидкостей до и после ее эксплуатации различны. Установлено, что ход зависимостей электропроводности  $\sigma$  от температуры  $t$  для образцов A-21 и AЭ-12 одинаков. Зависимость  $\sigma$  от  $t$  описывается полиномиальной (квадратичной) моделью. Показано, что электропроводность антифриза при характерных температурах (80–90 °C) охлаждающей жидкости в работающем двигателе не за-

висит от содержания в охлаждающей жидкости моноэтиленгликоля. Энергия активации ( $E_a$ ) вязкого течения составила 23 (AЭ-12) и 16 (A-21) эВ. Такое отличие значений  $E_a$ , как и величин самой вязкости позволяет сделать вывод о различиях в выполнении жидкостями своих функций при охлаждении силового агрегата. Сделано предположение, что более высокие значения водородного показателя AЭ-12 могут свидетельствовать о протекании электрохимической коррозии металлов, которые в процессе контакта с антифризом образуют короткозамкнутые гальванические пары. С помощью проведенного полного факторного эксперимента показано, что более высокие значения pH бывшего в эксплуатации антифриза могут быть отражением деградации свойств моноэтиленгликоля и протекающих процессов коррозии металлов.

## Список литературы

1. Курников М.В. Никонов А.С. Технические жидкости автомобиля // Вестник науки и образования. 2021. № 10–3 (113). С. 17–20.
2. Novotny V., Spale J., Szucs D.J., Tsai H.-Y., Kolyvatnik M. Direct integration of an organic Rankine cycle into an internal combustion engine cooling system for comprehensive and simplified waste heat recovery // Energy Reports. 2021. Vol. 7. Supplement 5. Pp. 644–656. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.07.088>

3. Курень С.Г., Дьяченко А.Д., Сокол Н.А., Клецкий М.Е., Цупак Е.Б., Вассель С.С. Квантовохимическое исследование компонентов автомобильного антифриза // Известия вузов. Северокавказский регион. Серия: Естественные науки. 2009. № 1 (149). С. 51–54.

4. Наглюк М.И. Влияние температуры на изменение электрической проводимости антифриза // Автомобильный транспорт. 2011. Вып. 29. С. 224–226.

5. Баширцева Н.Ю., Сладовская Ю.О., Овчинникова Ю.С., Ласковенкова Е.Е., Сибгатуллин А.А. Разработка охлаждающих жидкостей нового поколения с улучшенными эксплуатационными свойствами // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 11. С. 24–28.

6. Walkenbach J. *Excel 2010 Bible*. Hoboken: Wiley, 2010. 1058 p.

7. Кононюк А.Е. Основы научных исследований (общая теория эксперимента): в 4 кн. К. 1. К.: КНТ, 2011. 508 с.

8. Бойко А.Ф., Кудеников Е.Ю. Точный метод расчета необходимого количества повторных опытов // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2016. № 8. С. 128–132.

9. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. Л.: Наука, 1975. 375 с.

10. Bartenev G.M. Determining the activation energy of polymeric viscous flow from experimental data // *Polymer Science U.S.S.R.* 1964. Vol. 6. Issue 2. Pp. 383–389. [https://doi.org/10.1016/0032-3950\(64\)90322-3](https://doi.org/10.1016/0032-3950(64)90322-3).

11. Şimşek İ. Investigation of corrosion behaviors of Al-B4C-reinforced composite materials in different antifreeze solutions // *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2021. Vol. 57. Pp. 565–569. <https://doi.org/10.1134/S2070205121030229>

12. Гайдадин А.Н., Ефремова С.А. Применение средств ЭВМ при обработке активного эксперимента. Волгоград: ВолгГТУ, 2008. 16 с.

2. Novotny V, Spale J, Szucs DJ, Tsai H-Y, Kolovratnik M. Direct integration of an organic Rankine cycle into an internal combustion engine cooling system for comprehensive and simplified waste heat recovery. *Energy Reports*. 2021;7(Suppl. 5):644–656. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.07.088>

3. Kuren SG, Dyachenko AD, Sokol NA, Klets-kiy ME, Tsupak EB, Vassel SS. Quantum-chemical research of automobile antifreeze components. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences*. 2009;(1(149)):51–54. (In Russ.)

4. Naglyuk MI. Influence of temperature on change of electric conductivity of antifreeze. *Automobile Transport*. 2011;(29):224–226. (In Russ.)

5. Bashkirtseva NYu, Sladovskaya YuO, Ovchinnikova YuS, Laskovenkova EE, Sibgatullin AA. Development of new generation cooling liquids with improved operational properties. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2012;15(11):24–28. (In Russ.)

6. Walkenbach J. *Excel 2010 Bible*. Hoboken: Wiley, 2010.

7. Kononyuk AE. *Fundamentals of scientific research (general theory of experiment)* (book 1). K.: KNT Publ.; 2011. (In Russ.)

8. Boyko AF, Kudenikov EYu. Exact methods calculate the necessary amount of repeat experience. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2016;(8):128–132. (In Russ.)

9. Frenkel YI. *Kinetic theory of liquids*. Leningrad: Nauka Publ.; 1975. (In Russ.)

10. Bartenev GM. Determining the activation energy of polymeric viscous flow from experimental data. *Polymer Science U.S.S.R.* 1964;6(2):383–389. [https://doi.org/10.1016/0032-3950\(64\)90322-3](https://doi.org/10.1016/0032-3950(64)90322-3)

11. Şimşek İ. Investigation of corrosion behaviors of Al-B4C-reinforced composite materials in different antifreeze solutions. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2021;57: 565–569. <https://doi.org/10.1134/S2070205121030229>

12. Gaidadin AN, Efremova SA. *Application of computer facilities in processing an active experiment*. Volgograd: VolgSTU Publ.; 2008. (In Russ.)

## References

1. Kirpikov MV, Nikonov AS. Car technical fluids. *Bulletin of Science and Education*. 2021;(10–3(113)):17–20. (In Russ.)

## Сведения об авторах

Телков Олег Игоревич, магистрант департамента транспорта, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. E-mail: 1032202136@rudn.ru

Космачёва Анастасия Дмитриевна, магистрант департамента транспорта, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. E-mail: 1032202134@rudn.ru

Ходяков Александр Андреевич, кандидат химических наук, доцент департамента транспорта, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0001-9391-2890, Scopus Author ID: 6701565417, eLIBRARY SPIN-код: 4780-1919. E-mail: khodyakov-aa@rudn.ru

Хлопков Сергей Валентинович, кандидат технических наук, доцент департамента транспорта, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0001-9536-7558, Scopus Author ID: 5721210902, eLIBRARY SPIN-код: 8997-3305. E-mail: khlopkov-sv@rudn.ru

*Данилов Игорь Кеворкович*, доктор технических наук, директор департамента транспорта, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0000-0002-7142-7461, Scopus Author ID: 57210770802, eLIBRARY SPIN-код: 1633-2700. E-mail: danilov-ik@rudn.ru

#### **About the authors**

*Oleg I. Telkov*, master student, Department of Transport, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. E-mail: 1032202136@rudn.ru

*Anastasia D. Kosmacheva*, master student, Department of Transport, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. E-mail: 1032202134@rudn.ru

*Alexander A. Khodyakov*, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-9391-2890, Scopus Author ID: 6701565417, eLIBRARY SPIN-code: 4780-1919. E-mail: khodyakov-aa@rudn.ru

*Sergey V. Khlopkov*, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-9536-7558, Scopus Author ID: 57212109092, eLIBRARY SPIN-code: 8997-3305. E-mail: khlopkov-sv@rudn.ru

*Danilov Igor Kevorkovich*, Doctor of Technical Sciences, Director of the Department of Transport, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-7142-7461, Scopus Author ID: 57210770802, eLIBRARY SPIN-code: 1633-2700. E-mail: danilov-ik@rudn.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2021-22-4-339-347  
UDC 577.4:621.039.584

Research article / Научная статья

## Features of modeling a highly efficient multistage vapor compression heat pump unit

Yuri A. Antipov ✉, Irina I. Shatalova , Kirill V. Shkarin ,  
Mikhail V. Lapin , Dmitry A. Sokolov , Artem O. Grinin, Kirill P. Toptygin 

*Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia*

✉ antipov-yua@rudn.ru

### Article history

Received: May 14, 2021

Revised: August 23, 2021

Accepted: September 12, 2021

### Keywords:

heat pump unit, secondary energy resources, heat recovery, coefficient of performance, computer simulation

**Abstract.** The increase in the cost of fuel and energy resource and the deterioration of the environment from the combustion of traditional fossil fuel, have led to a great interest in energy-saving technology by using secondary energy resources in the thermal energy of industrial, housing and communal services using heat pump units in Russia and abroad. This paper analyzes the well-known two-stage heat pump units, and reveals their advantages in comparison with single-stage. The modeling of a highly efficient multistage vapor compression heat pump unit is proposed. Moreover, a method for calculating a multistage heat pump unit with a high coefficient of performance is presented. In addition, an example of calculating the thermodynamic cycle of a four-stage heat pump unit is presented. The influence of the number of stages on the increase in coefficient of performance in relation to a single-stage heat pump unit, the effect of the temperature difference between the temperature of the high-potential heat source and the temperature of the low-potential heat source on the coefficient of performance were analyzed. In addition, the influence of the initial value of the temperature of the high-potential heat source before heating during the course in the heat pump unit on the value of coefficient of performance for a different number of stages is analyzed under the condition of a constant difference between the heating temperature of the high-potential heat source at the outlet of the heat pump unit and the temperature of the low-potential heat source.

### Acknowledgements

This paper has been supported by the RUDN University Strategic Academic Leadership Program.

### For citation

Antipov YuA, Shatalova II, Shkarin KV, Lapin MV, Sokolov DA, Grinin AO, Toptygin KP. Features of modeling a highly efficient multistage vapor compression heat pump unit. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(4):339–347. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-4-339-347>



## Особенности моделирования высокоэффективной многоступенчатой парокompрессионной теплонасосной установки

Ю.А. Антипов  , И.И. Шаталова , К.В. Шкарин ,  
М.В. Лапин , Д.А. Соколов , А.О. Гринин, К.П. Топтыгин 

*Российский университет дружбы народов, Москва, Россия*

 antipov-yua@rudn.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 14 мая 2021 г.  
Доработана: 23 августа 2021 г.  
Принята к публикации: 12 сентября 2021 г.

### Ключевые слова:

теплонасосная установка, вторичные энергоресурсы, утилизация тепла, коэффициент трансформации теплоты, моделирование

**Аннотация.** В последнее время вследствие повышения стоимости топливно-энергетических ресурсов и ухудшения экологии от сжигания традиционного органического топлива в России и за рубежом проявился большой интерес к энергосберегающей технологии путем использования вторичных энергоресурсов в тепловой энергии промышленного и жилищно-коммунального хозяйства при помощи теплонасосной установки. В работе анализируются известные двухступенчатые теплонасосные установки, раскрываются их преимущества по сравнению с одноступенчатыми. Предложено моделирование высокоэффективной многоступенчатой парокompрессионной теплонасосной установки, представлена методика расчета многоступенчатой теплонасосной установки с высоким коэффициентом трансформации теплоты. Приведен пример расчета термодинамического цикла четырехступенчатой теплонасосной установки. Проанализировано влияние количества ступеней на прирост коэффициента преобразования по отношению к одноступенчатой теплонасосной установке, а также влияние разности температур между температурой источника высокопотенциальной теплоты и температурой источника низкопотенциальной теплоты на величину коэффициента трансформации теплоты. Изучено влияние начального значения температуры источника высокопотенциальной теплоты перед нагревом на входе теплонасосной установки на величину коэффициента трансформации теплоты для различного количества ступеней при условии постоянной разности температуры нагрева источника высокопотенциальной теплоты на выходе из теплонасосной установки и температурой источника низкопотенциальной теплоты.

### Благодарности

Публикация выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства РУДН.

### Для цитирования

Антипов Ю.А., Шаталова И.И., Шкарин К.В., Лапин М.В., Соколов Д.А., Гринин А.О., Топтыгин К.П. Особенности моделирования высокоэффективной многоступенчатой парокompрессионной теплонасосной установки // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 4. С. 339–347. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-4-339-347>

### Introduction

In recent decades in our country and, especially abroad, there has been a great interest in the use of secondary energy resources in thermal energy of industrial, housing and communal services. This is mainly caused by a sharp increase in the cost of fuel and energy resources, in addition, the decrease in their reserves and the environmental consequences of burning traditional fossil fuel. One of the solutions to these problems today is the use of energy-saving technologies based on the use of heat pump

units (HPUs). Heat pumps utilize low-potential heat source (LHS) from industrial, domestic and natural sources, and generate high-potential heat, while consuming 1.2–1.3 times less primary energy than with direct fuel combustion<sup>1</sup> [1–4]. It is known that a significant part of heat supply (communal and

<sup>1</sup> ANSI/AMCA 210. *Laboratory methods of testing fans for rating*. Arlington; 1985; ASHRAE Guideline, 2. *Engineering analysis of experimental data*. Atlanta; 1986; ASHRAE Standard 116. *Methods of testing for seasonal efficiency of unitary air-conditioner and heat pumps*. Atlanta; 1993.

industrial) in developed countries is carried out using heat pumps [5; 6].

Heat pumps works based on a reversed thermodynamic cycle on a low-boiling point refrigerant.

The theoretical foundations of an HPU are formed as a result of the study of thermodynamic cycles and processes, the development of a methodology for the selection of structures and calculation of the main elements of heat pumps. The most widespread HPUs at the moment are vapor compression HPUs, in which a vapor-liquid cycle is implemented, where the working fluid (refrigerant) is in the form of liquid, wet steam, superheated steam at pressures and temperatures below critical values.

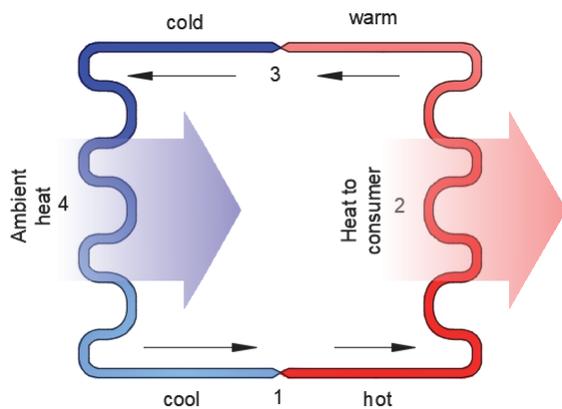


Figure 1. The main elements of HPU

The second problem is to ensure the maximum efficiency of the HPU at variable temperatures of condensation and boiling of the refrigerant, which vary depending on the LHS and the required temperature of the water heated in the condenser. This issue has not been resolved yet. However, an acceptable result can be achieved by fragmentation of the HPU and using circuit solutions, in which hot water is heated in condensers and the LHS is cooled in evaporators when the HPU is switched on in series with a lower compression ratio and counter-flow of heated and cooled water. This method is used by the company “Energy” for relatively powerful HPU (more than 1 Gcal/hour) and leads to an increase of the conversion factor by 1.5–1.8.

Figure 1 schematically shows the main elements of the basic one-stage HPU. Compressor 1 pumps the refrigerant taking into account hydraulic losses to the saturated vapor pressure of the refrigerant in condenser 2. Due to polytropic compression, the temperature of the superheated refrigerant vapor at the inlet to the condenser becomes higher than the tempera-

ture of the saturated vapor of the refrigerant in the condenser. Wherein the refrigerant delivers the HHS to the consumer due to the cooling of the superheated vapor, the phase transition from vapor to liquid and the supercooling of the latter. Reducer 3 is required for throttling the refrigerant. Wherein the refrigerant changes from the liquid phase into the vapor phase. The process of the phase transition takes place in the evaporator 4, where heat from the LHS is transferred to the refrigerant.

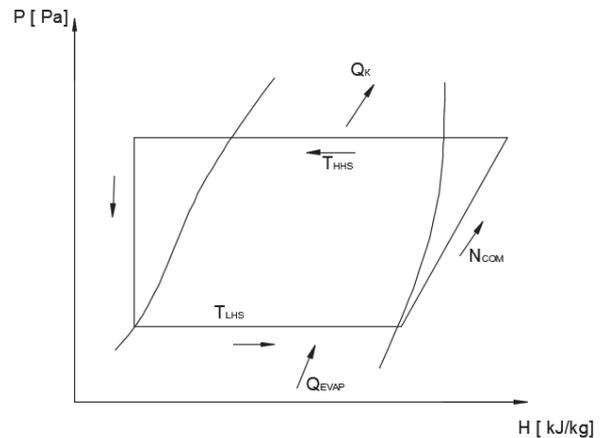


Figure 2. PH diagram of the thermodynamic ideal cycle of HPU

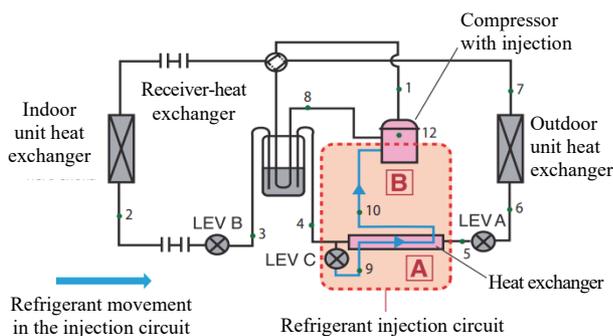
Figure 2 shows the PH diagram of the thermodynamic cycle of a single-stage HPU. One of the main criteria for the efficiency of the HPU operation is the coefficient of performance (COP):

$$COP = \frac{Q_k}{N_{com}},$$

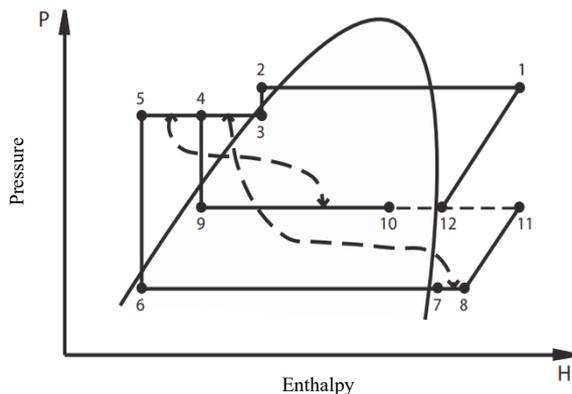
where  $Q_k$  is the power of heat flow transferred to the consumer, kW;  $N_{com}$  is the consumed power of the HPU compressor, kW.

The COP value is largely dependent on the temperature difference between the LHS and the HHS. The temperatures of the sources are often considered constant, and the COP is compared with the maximum theoretically possible value (according to the Carnot cycle). However, at the inlet and outlet of the HPU, these temperatures are very different (the temperatures of the HHS inlet and outlet appear, as well as for the LHS), therefore, in this case, when calculating the COP, it is usually noted what temperature difference must be taken into account between the HHS and the LHS. For example, the supply of hot water to a residential building (the temperature of the HHS outlet) was carried out using a single-stage HPU, which absorbed heat from the groundwater

(the temperature of the LHS inlet). When the temperature difference between HHS and LHS is equal to 10, 30 and 50 °C, the COP is 7, 3.5 and 2.9 respectively, which indicates a decrease in the efficiency of the HPU by 2 or more times [7. P. 61]. Currently, scroll-type compressors with an intermediate supply of vapor-liquid injection of refrigerant into the cavity of the scroll channel are being widely used in HPUs, where, in fact, a single-stage scroll compressor turns into a two-stage.<sup>2</sup> Figure 3 shows a schematic diagram of the HPU with a refrigerant injection circuit, while Figure 4 shows the *PH* diagram of the thermodynamic cycle of this HPU in heating mode.



**Figure 3.** Schematic diagram of an HPU with a refrigerant injection circuit<sup>3</sup>



**Figure 4.** *PH* diagram of the HPU thermodynamic cycle in heating mode

Such an HPU scheme allows to reduce the temperature of the refrigerant during the compression

process and thereby reduce the power consumption of the compressor. Therefore, at an ambient air temperature of 7 °C, the HPU heats the air indoors from 20 to 45 °C with a COP coefficient of 5. The disadvantage of the considered HPU scheme is mainly the pumping of the entire refrigerant flow through two compressor stages [8–10].

## 1. Objectives

The aim of the study is to improve the efficiency of a multistage vapor compression HPU at a high value of temperature difference between HHS and LHS, in addition, to simulate a multistage steam-compression HPU, develop a mathematical model and a calculation method for a multistage HPU, which provides a high COP with a relatively high value of temperature difference between HHS and LHS.

## 2. Computational studies

### 2.1. Subject of study

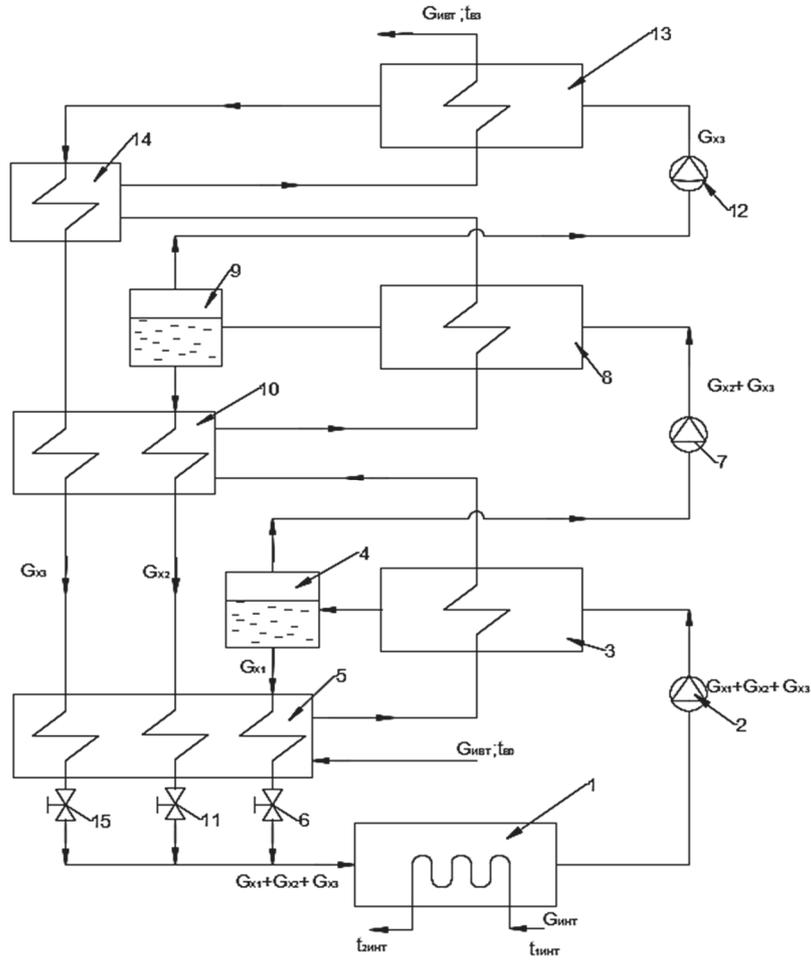
The authors of this work within the framework of the 5–100 Program in the Department of Mechanical and Instrumentation Engineering at the Academy of Engineering in RUDN University developed an experimental model of a two-stage heat pump unit, in which the principle of sequential stepwise heating of the consumer's working medium was tested and experimentally confirmed with simultaneous withdrawal of the refrigerant from each stage. The schematic diagram, in particular, of a three-stage heat pump installation is shown in Figure 5, and the *PH* diagram of the thermodynamic cycle of this HPU in heating mode is shown in Figure 6.

This technical solution is protected by a utility model patent and an invention patent.<sup>4</sup> As it can be seen from the *PH* diagram of the HPU thermodynamic cycle, the total refrigerant flow passes through the compressor of the first stage ( $G_1 + G_2 + G_3$ ), in the condenser of the first stage, the refrigerant with the flow rate  $G_1$  rejects the high-potential heat source HHS to the consumer due to the cooling of the superheated steam, phase transition from vapor to liquid and overcooling.

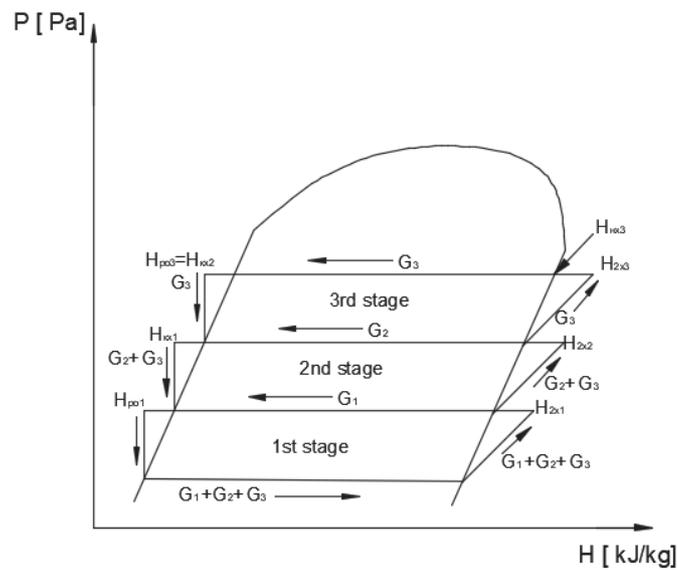
<sup>4</sup> Antipov YA, Shatalov IK, Sobennikov EV. *Multistage heat pump unit*. Utility model patent 140197 RF, IPC F25B30/00. No. 2013117874/06. Declared 18.04.2013. Publication 10.05.2014. (In Russ.); Antipov YA, Shatalov IK, Silin AV, Shkarin KV, Sobennikov EV. *Multistage heat pump unit*. Patent for invention 2705696 RF, IPC F25B30/00, F25B1/10. No. 2017102563. Declared 26.01.2017. Publication 25.01.2018. (In Russ.)

<sup>2</sup> Heat pump with inverter PUAZ-SHW ZUBADAN INVERTER series. (In Russ.) Available from: [https://www.mitsubishi-aircon.ru/product/products/description/puhz-shw\\_2018.pdf](https://www.mitsubishi-aircon.ru/product/products/description/puhz-shw_2018.pdf) (accessed: 11.05.2021).

<sup>3</sup> Ibid.



**Figure 5.** Schematic diagram of a three-stage HPU:  
 1 – evaporator; 2, 7, 12 – compressor of the first, second and third stages; 3, 8, 13 – condenser of the first, second and third stages;  
 4, 9 – separators of the refrigerant fractions; 5, 10, 14 – refrigerant subcoolers; 6, 11, 15 – reducer



**Figure 6.** PH diagram of the thermodynamic cycle of a three-stage HPU

The remaining total refrigerant flow ( $G_2 + G_3$ ) is cooled down to the saturated vapor temperature of the first stage condenser and is pumped out by the second stage compressor. Further, in the second stage condenser, the refrigerant with the flow rate  $G_2$ , by analogy with the first stage, reject the HHS to the consumer. The remaining refrigerant with a flow rate  $G_3$  through the third compressor enters the condenser of the third stage and, by analogy with the previous stages, through the subcoolers and the corresponding reducer enters the evaporator.

## 2.2. Calculation method of a multistage compression HPU

The calculation method of a multistage vapor compression HPU is based on the distribution of the fraction of refrigerant flow between all stages, this is initially set by the following initial data:

1. Thermal performance of the multistage HPU –  $Q$ , MW.

2. Type of refrigerant.

3. Temperature of the low-potential heat source

LHS:

– refrigerant temperature at evaporator inlet

$t_{H1}$ , °C;

– refrigerant temperature at evaporator outlet

$t_{H2}$ , °C.

4. Temperature of the high-potential heat source HHS:

– refrigerant temperature at condenser outlet of the last stage of the HPU  $t_{he}$ , °C;

– refrigerant temperature at condenser inlet of the first stage of the HPU  $t_{H1,1}$ , °C.

5. The efficiency of the HPU compressors is selected within the range 0.6–0.85.

Then, we determine the value of the temperature rise of the HHS after each stage of the HPU:

$$\Delta t_{st} = \frac{t_{Hz} - t_{H1,1}}{z},$$

where  $t_{vz}$  – condenser outlet temperature of the last stage of the HPU;  $t_{H1,1}$  – subcooler HHS inlet temperature of the first stage of the HPU;  $z$  – number of HPU stages.

According to the  $PH$  diagram, we determine for each stage the temperature of saturated vapors starting from the condenser of the penultimate stage to the condenser of the first stage according to the formula

$$t_{H[z-i]} = t_{Hz} - \Delta t_{st},$$

where  $i$  – the number of the HPU intermediate stage (the stages are counted from the low-pressure stage);  $z$  – number of the last stage of the HPU.

6. The saturated vapor temperature in the last stage condenser is calculated by the formula

$$t_{Hz} = t_{hz} + \Delta t_{cz},$$

where  $\Delta t_{cz}$  – underheating of HHS in the last stage condenser;  $\Delta t_{cz} = 2-8$  °C.

7. A thermodynamic cycle is developed, starting from the last stage of a multistage HPU in the  $PH$  diagram (Figure 6):

– the isotherms  $t_{Hz} = \text{const}$ , and  $t_{z-1} = \text{const}$  are drawn in the area of the  $PH$  diagram away from the saturation line  $x = 0$  to the saturation line  $x = 1$ ;

– compressor inlet temperature of the refrigerant at the last stage is calculated by the formula

$$t_{az} = t_{Hz} + \Delta t_{pz},$$

where  $\Delta t_{pz} = 1-4$  °C – overheating of the refrigerant behind the saturation line;

– taking into account the hydraulic losses of the refrigerant at the inlet and outlet of the compressor of the last stage, the pressure at the compressor inlet is calculated by the formula

$$p_{1(z-1)} = p_{H(z-1)} - \Delta p_{1(z-1)},$$

and

$$p_{2z} = p_{Hz} + \Delta p_{2z},$$

where  $p_{Hz}$  and  $p_{H(z-1)}$  – saturated vapors pressure of the refrigerant, respectively, of the condensers of the last and penultimate stages of the HPU;  $\Delta p_{2z}$  and  $\Delta p_{1(z-1)}$  – pressure loss of refrigerant vapor respectively, at the outlet and inlet to the compressor, which in the first approximation can be taken equal to 1.5% of the pressure at the outlet and inlet to the compressor respectively.

To develop the process of adiabatic work of refrigerant compression from the point of start of compression from the point 1(z-1) an adiabat is drawn to the intersection with the isobar  $p_{2z}$  at point 2z<sub>ad</sub>, and on the  $PH$  diagram, we determine the enthalpy of the refrigerant  $H_{1(z-1)}$  and  $H_{2zad}$ ;

– taking into account the efficiency of the compressor, we calculate the work expended in compression of one kg refrigerant of the last stage:

$$L_z = \frac{1}{\eta_i} (H_{2zad} - H_{1(z-1)}); \quad (1)$$

– then we calculate the enthalpy of the refrigerant at the compressor outlet of the last stages:

$$H_{2z} = H_{1(z-1)} + L_z.$$

In the  $PH$  diagram, at the intersection points  $t_{Hz}$ ,  $t_{H(z-1)}$  with the saturation line  $x = 0$ , we find the saturation enthalpy of the refrigerant  $H_{cz}$  and  $H_{c(z-1)}$  respectively;

– then we determine the enthalpy of the refrigerant at subcooler outlet of the  $i$ -th stage of the HPU  $H_{p0[z-(n-i)]}$ . In the case of heat transfer in the subcooler from the refrigerant to the HHS in the  $i$ -th stage, it is possible to assume  $H_{poi} = H_{cR[i-1]}$ .

8. The heat balance equation of the last stage of the HPU as follows:

$$G_{HHS}C_{P_{HHS}}(t_{Hz} - t_{H(z-1)}) = G_{xz}(H_{2z} - H_{H(z-1)})\eta_{eff},$$

where  $G_{HHS}$  and  $G_{xz}$  – flowrate in seconds of the HHS and refrigerant in the last stage of the HPU respectively;  $\eta_{eff} = 0.99$  – condenser thermal efficiency;  $C_{P_{HHS}}$  – average mass heat capacity of the HHS in the temperature range from  $t_{h(z-1)}$  to  $t_{Hz}$ .

Solving the heat balance equation, we calculate the fraction of the refrigerant flowrate  $\alpha_z$  of the last stage of the HPU for heating one kilogram of HHS:

$$\alpha_{xz} = \frac{G_{xz}}{G_{HHS}} = \frac{C_{P_{HHS}}(t_{Hz} - t_{H(z-1)})}{(H_{2z} - H_{H(z-1)})\eta_{eff}}.$$

9. Further, by analogy with the heat balance of the last stage, we compose the equation of the heat balance of the intermediate  $i$ -th stage of the HPU:

$$\begin{aligned} G_{HHS}C_{P_{HHS}}(t_{HHS[i]} - t_{HHS[i-1]}) &= \\ &= G_{x[i]}(H_{2x[i]} - H_{cx[i-1]})\eta_{eff} + \\ &+ (G_{xz} + G_{x(z-1)} + \dots + G_{x[i+1]}) \times \\ &\times (H_{2x[i]} - H_{Hx[i]})\eta_{eff} + \\ &+ (G_{xz} + G_{x(z-1)} + \dots + G_{x[i+1]}) (H_{cx[i]} - H_{cx[i-1]})\eta_{eff}. \end{aligned}$$

Finally, we obtain:

$$\begin{aligned} \alpha_{x[i]} &= \frac{C_{P_{HHS}}(t_{HHS[i]} - t_{HHS[i-1]})}{(H_{2x[i]} - H_{cx[i-1]})\eta_{eff}} - \\ &- \frac{(\alpha_{xz} + \alpha_{x(z-1)} + \dots + \alpha_{x[z-(i+1)]})(H_{2x[i]} - H_{Hx[i]})}{(H_{2x[z-(n-i)]} - H_{cx[z-(n-i+1)]})\eta_{eff}} - \\ &- \frac{(\alpha_{xz} + \alpha_{x(z-1)} + \dots + \alpha_{x[i+1]})(H_{cx[i]} - H_{cx[i-1]})}{(H_{2x[i]} - H_{cx[i-1]})\eta_{eff}}, \end{aligned} \quad (2)$$

where  $\alpha_{x[i]} = G_{x[i]}/G_{HHS}$  – fraction of the refrigerant flowrate of the  $i$ -th stage of then HPU to the flowrate of one kilogram of HHS.

10. Knowing the fraction of the refrigerant consumption of each stage, it is possible to determine the compressor power of each HPU stage according to the formula:

$$N_{[i]} = G_{HHS}L_{[i]}(\alpha_{xz} + \alpha_{x(z-1)} + \dots + \alpha_{x[i]}). \quad (3)$$

11. The total power of the multistage HPU:

$$N_{\Sigma} = \sum_{i=1}^z N_{[i]}. \quad (4)$$

12. The COP is calculated as follows:

$$COP = \frac{G_{HHS}C_{P_{HHS}}(t_{Hz} - t_{H1,1})}{N_{\Sigma}}. \quad (5)$$

### 2.3. Results

As an example, we considered a four stage HPU using the following initial parameters: refrigerant – R-600; HHS – water;  $t_{H1,1} = 8$  °C – water temperature at the inlet subcooler of the 1st stage of HPU;  $t_{Hz} = 88$  °C – water temperature at the outlet of the condenser of the 4th stage of the HPU;  $G_{HHS} = 1$  kg/s – consumption of the heated HHS (water) in a four-stage HPU.

It is assumed that:  $\Delta t_{cz} = 2$  °C – underheating of the HHS in the condenser in each stage of the HPU;  $\Delta t_{pz} = 1$  °C – overheating of the refrigerant at the compressor inlet of each HPU stage;  $\eta_i = 0,85$  – internal efficiency of each compressor in the HPU;  $\eta_{eff} = 0.99$  – thermal efficiency of the condenser at each stage of the HPU.

1. The amount of heating the HHS in each stage of the HPU was calculated:

$$\Delta t_{ist} = \frac{t_{Hz} - t_{H1,1}}{n} = \frac{88 - 8}{4} = 20 \text{ °C}.$$

Then the temperature of saturated vapors in the fourth stage condenser is calculated:  $t_{H4} = 88 + 2 = 90$  °C; third stage  $t_{H3} = 70$  °C; second stage  $t_{H2} = 50$  °C; and first stage  $t_{H1} = 30$  °C.

2. The thermodynamic cycle of the fourth stage of a multistage HPU in the  $PH$  diagram is developed.

3. The results of the enthalpy values at the points of the four-stage HPU are presented in Table 1.

Starting from the fourth stage, we calculate the fraction of the refrigerant flowrate in seconds of each HPU stage, to the flowrate of one kilogram of HHS according to the formula (2), the work of com-

pression of 1 kg of refrigerant of the compressor of each stage is calculated by the formula (1), the compressor power of each stage is calculated by the formula (3), the values of which are presented in Table 2.

Table 1

**Refrigerant enthalpies at characteristic points of the PH diagram of the thermodynamic cycle of a four-stage HPU, kJ/kg**

Stage number	$H_1$	$H_2$	$H_{xH}$	$H_{xc}$	$H_{po}$
4	682	708.4	707.8	426.5	373.6
3	654	683.45	680.7	373.6	321.6
2	637	658.16	652.8	321.6	271.8
1	597	631.7	625.3	271.8	223.4

Table 2

**The calculation results of the four-stage HPU**

Stage number	$\alpha_{xi}$	$L_i$ , kJ/kg	$N_i$ , kW
1	0.1049	32.06	22.685
2	0.1545	27.79	16.75
3	0.1954	24.27	10.88
4	0.2528	21.25	5.37

Note:  $\alpha_{xi}$  – refrigerant consumption fraction;  $L_i$  is the work expended to compress 1 kg refrigerant;  $N_i$  – compressor power of each HPU stage.

4. Using formulas (4) and (5), we calculate the total power of the HPU and  $COP_4$ :  $N_{HPU4} = 55.68$  kW;  $COP_4 = 6.02$ . For reference, the power of the compressor and  $COP_1$  of a single-stage HPU, other things being equal, are equal to  $N_{HPU1} = 90.35$  kW;  $COP_1 = 4.71$ . As can be seen from the above calculations, water heating from 10 to 90 °C with a flow-rate of 1 kg/s (the thermal power of water heating is 425.5 kW), replacing the one-stage HPU with a four-stage one, it is possible to reduce the total compressor power by 34.67 kW.

Therefore, replacing a one-stage HPU with a four-stage one will lead to a relative increase  $\Delta COP = 23\%$ .

According to the above methodology, an additional calculation of two-, three- and five-stage HPU was carried out, the result of which is shown in Table 3.

Table 3 shows that the main relative increase in  $\Delta COP$  falls on the two-stage HPU. Further, this increase at subsequent stages decreases sharply and becomes less than 5%.

Table 3

**Change in the COP depending on the number of HPU stages**

Number of HPU stages	COP	$\Delta COP$ relative to 1-stage HPU, %	$\Delta COP$ relative to the previous stage of HPU, %
1	4.71	0	0
2	5.54	15	15
3	5.84	19.35	5.13
4	6.02	21.76	2.99
5	6.13	23.16	1.79

The influence of the water temperature at the inlet to the first stage subcooler on the efficiency of the multistage HPU operation at a constant temperature  $t_{H2} = 90$  °C is considered; and the temperature at the inlet to the evaporator  $t_{H1} = 10$  °C.

Table 4

**Change in the COP depending on the water temperature at the HPU inlet**

Number of HPU stages	COP HPU at different values of $t_{H1,1}$					
	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
1	4.71	4.53	4.27	4.05	3.80	3.55
2	5.54	5.068	4.74	4.344	4.3335	3.68
3	5.48	5.269	4.854	4.278	4.15	3.797
4	6.02	5.845	4.95	4.562	4.252	–

The calculation results given in Table 4 clearly show a gradual decrease in the COP of HPU with a different number of stages with an increase in the temperature difference ( $t_{H1,1} - t_{H1}$ ).

## Conclusion

The outlined method for calculating the thermodynamic cycle makes it possible to simulate a multi-stage vapor compression heat pump installation, in which, with an increase in the number of stages, the COP increases to 20–23% and the main increase in  $\Delta COP$ , equal to 15%, falls on the two-stage HPU.

## References

1. Bell I, Groll E, Braun J, Horton T. Performance of vapor compression systems with compressor oil flooding and regeneration. *Int. J. Refrigeration*. 2011;34(1):234–242. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2010.09.004>
2. Bertsch SS. Theoretical and experimental investigation of a two stage heat pump cycle for Nordic climates. Master's thesis, Mechanical Engineering, Herrick Labs 2005-13P, Report No. 7031-1. West Lafayette: Purdue University; 2005.

3. Dabiri A, Keith Rice C. A compressor simulation model with corrections for the level of suction gas superheat. *ASHRAE Transactions*. 1981;87(2):771–782.

4. Bertsch SS, Groll EA. Two-stage air-source heat pump for residential heating and cooling applications in northern U.S. climates. *International Journal of Refrigeration*. 2008;31(7):1282–1292. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2008.01.006>

5. Bertsch SS, Groll E. Two-stage air-source heat pump for residential heating and cooling applications in northern U.S. climates. *International Journal of Refrigeration*. 2008;31(7):1282–1292. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2008.01.006>

6. Heo J, Jeong MW, Jeon J, Kim Y. Effects of gas injection on the heating performance off two-stage heat pump using a twin rotary compressor with refrigerant charge amount. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*. 2008;16:77–82.

7. Gorshkov VG. Heat pumps. Analytical review. *Handbook of industrial equipment VVT*. 2004;2:47–80. (In Russ.)

8. Wang X, Hwang Y, Radermacher R. Two-stage heat pump with vapor-injected scroll compressor using R410A as a refrigerant. *International Journal of Refrigeration*. 2009;32(6):1442–1451. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2009.03.004>

9. Ma G, Zhao H. Experimental study of a heat pump system with flash-tank coupled with scroll compressor. *Energy and Buildings*. 2008;40(5):697–701. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.05.003>

10. Nguyen M, Hewitt N, Huang M. Performance evaluation of an air source heat pump using economized vapor injection compressor and flash tank coupled with capillary tubes. *Proceeding of International Congress of Refrigeration, Beijing, China*. 2007;8(21):ICR07-E2-1110.

#### About the authors

*Yuri A. Antipov*, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Instrumentation, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-5598-7522, Scopus Author ID: 57207723134, eLIBRARY SPIN-code: 3410-0544, Author ID: 260934. E-mail: antipov-yua@rudn.ru

*Irina I. Shatalova*, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Innovative Management in Industries, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-7302-4247, Scopus Author ID: 57200276456, eLIBRARY SPIN-code: 2455-4647. E-mail: shatalova-ii@rudn.ru

*Kirill V. Shkarin*, postgraduate student, Department of Mechanical Engineering and Instrumentation, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-5680-517X, Scopus Author ID: 57208439232, eLIBRARY SPIN-code: 4599-9150. E-mail: 1042180018@rudn.ru

*Mikhail V. Lapin*, postgraduate student, Department of Mechanical Engineering and Instrumentation, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). ORCID: 0000-0002-0100-6055, eLIBRARY SPIN-code: 2738-2073. E-mail: 1042200019@rudn.ru

*Dmitry A. Sokolov*, postgraduate student, Department of Mechanical Engineering and Instrumentation, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-5175-2219. E-mail: 1042190196@rudn.ru

*Artyom O. Grinin*, student, Department of Mechanical Engineering and Instrumentation, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. E-mail: 1032182301@rudn.ru

*Kirill P. Toptygin*, student, Department of Mechanical Engineering and Instrumentation, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-6054-2096, Scopus Author ID: 57251505700. E-mail: 1032182294@rudn.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2021-22-4-348-354  
УДК 616.728:678.8

Научная статья / Research article

## Разработка композитной конструкции биомеханического назначения

И.М. Борисов , С.В. Резник ✉

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),  
Москва, Россия

✉ sreznik@bmstu.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 31 августа 2021 г.  
Доработана: 17 октября 2021 г.  
Принята к публикации: 22 октября 2021 г.

### Ключевые слова:

протез, нижняя конечность, стопа,  
углепластик, моделирование, техно-  
логия

**Аннотация.** Разработка новой конструкции протеза нижней конечности представляет интерес для обеспечения нового уровня комфорта для людей с ограниченными возможностями при взаимодействии с пересеченной местностью и наклонными поверхностями. На основе существующих аналогов и современных работ в области протезирования предложены три концепта конструкции протеза стопы из композитного материала (углепластик), созданы пространственные модели поверхностей, твердотельные модели и фотореалистичные визуализации. Для подтверждения работоспособности и функциональности конструкций, а также для определения напряженно-деформированного состояния, возникающего при взаимодействии с поверхностью, имеющей наклон  $15^\circ$  относительно горизонтальной плоскости, используется метод конечных элементов на пространственных моделях четырех вариантов конструкций. Посредством компьютерных симуляций взаимодействия протезов с наклонной поверхностью проведен сравнительный анализ различных вариантов конструкции протеза нижней конечности в одинаковых условиях. Полученные результаты показали, что данное конструкторское решение работоспособно и как минимум на 14,4 % эффективнее стандартных конструкций, имеющих одну прорезь в пружинном элементе, и на 44,5 % эффективнее конструкций, не имеющих прорезей в пружинных элементах, при взаимодействии с пересеченной местностью и наклонными поверхностями.

### Для цитирования

Борисов И.М., Резник С.В. Разработка композитной конструкции биомеханического назначения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 4. С. 348–354.  
<https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-4-348-354>

## Development of a composite structure for biomechanical purposes

Ivan M. Borisov , Sergey V. Reznik ✉

Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology), Moscow, Russia

✉ sreznik@bmstu.ru

### Article history

Received: August 31, 2021  
Revised: October 17, 2021  
Accepted: October 22, 2021

**Abstract.** The development of a new design of a leg prosthesis for interaction with inclined surfaces is of interest to provide a new level of comfort for people with disabilities. Based on the analogues and modern works in the prosthetics sphere, three concepts of the prosthesis design are proposed. Spatial models



**Keywords:**

prosthesis, feet, foot, composite, carbon fiber reinforced plastic, modeling, technology

of surfaces and solid models have been created. To confirm the operability of structures and determine the stress-strain state that occurs when interacting with a surface having a slope of 15° relative to the horizontal plane, the finite element method is used on spatial models of four variants of geometry. A comparative analysis of various variants of the prosthesis design under the same conditions is carried out. The results obtained showed that this design solution is workable, suitable for production and for 14.4% more efficient than standard designs with one slot in the spring element and 44.5% more efficient than designs without slots in the spring elements.

**For citation**

Borisov IM, Reznik SV. Development of a composite structure for biomechanical purposes. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(4):348–354. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-4-348-354>

**Введение**

В настоящее время область протезирования нижних конечностей является перспективной как с точки зрения внедрения научно-технических инноваций, так и с точки зрения коммерциализации, в связи с чем проводится много исследований<sup>1</sup> [1–8]. Протезы нижних конечностей (ПНК) являются средством реабилитации при ампутации, утере конечности или ее ампутации.

В 2020 г. мировой рынок полуфабрикатов для протезов нижних конечностей оценивался в 1,3–1,4 млрд долл. США с ежегодным ростом порядка 3–5 %<sup>2</sup>. Количество пользователей протезов нижних конечностей ежегодно прирастает на более чем 750 000 человек по всему миру.

Основные аспекты необходимые для создания перспективных протезов стопы – повышение функциональности, уменьшение массы конструкции, повышение устойчивости.

По отзывам пользователей протезов стоп, существует проблема устойчивости при взаимодействии с наклонными и неровными поверхностями, имеющими уклон более 7°, а у пациентов возникает неприятное давящее ощущение в культеприемной гильзе. Поэтому основная цель исследования – разработка протеза новой конструкции повышенной адаптивности при взаимодействии с наклонными опорными поверхностями.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- анализ современного состояния работ в области протезирования стоп;
- исследование особенностей изготовления протезов стопы;
- разработка нового варианта конструкции будущего изделия;
- моделирование напряженно-деформированного состояния для нескольких конструкций и выбор лучшего варианта.

На основе поставленных задач впервые предложена и проанализирована композитная конструкция, позволяющая снизить нагрузку на культу пользователя при взаимодействии с наклонными поверхностями. Впервые предложено и исследовано влияние момента во фронтальной плоскости в качестве количественной характеристики адаптивности протеза к наклонным поверхностям. Также разработанная конструкция может быть использована в качестве основы для разработки нового поколения углепластиковых стоп повышенной адаптивности.

**1. Современное состояние работ в области протезирования нижних конечностей**

**1.1. Виды протезов нижних конечностей**

Самый распространенный вид ПНК – пассивно-функциональный, который обеспечивает опорную функцию и восполняет общие функции ходьбы, не требуя специальной электроники.

Существует четыре группы активности (согласно классификации от компании OSSUR), которые определяют тип протеза для пациента в зависимости от его повседневной деятельности:

- первая группа – низкий уровень активности – косметические протезы, выполняющие опорную функцию и слабо восстанавливающие функции ходьбы;

<sup>1</sup> Патент 2345736 Российская Федерация. Протез стопы / Б.В. Таунсенд; № 2006138501/14; заявл. 01.04.05; опубл. 10.02.09. 2 с.; Патент 2150916 Российская Федерация. Протез стопы / В.Н. Терешин; № 98113247/14; заявл. 03.07.98; опубл. 20.06.00. 1 с.; Патент su 1159569 a1 СССР. Протез стопы / Н.А. Яковлев; № 3675207; заявл. 12.12.83; опубл. 07.06.85.

<sup>2</sup> Annual report. OSSUR. 2020. URL: <https://annual-report.ossur.com/> (accessed: 03.03.2021).

– вторая и третья группы – средний и высокий уровень активности – самые распространенные и самые универсальные группы. Протезы восстанавливают функции ходьбы и бега;

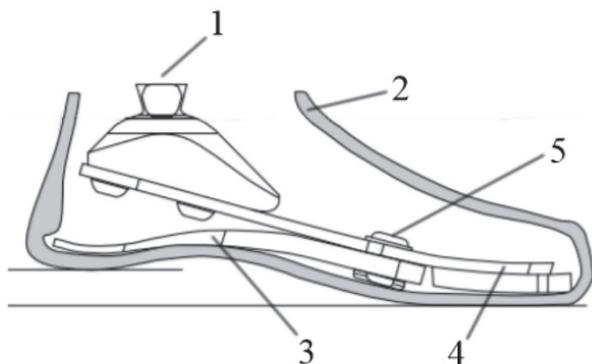
– четвертая группа – специализированные спортивные протезы. Не предназначены для повседневного использования<sup>3</sup>.

## 1.2. Особенности конструкций пассивно-функциональных протезов стопы

Общая функция протеза – частичная разгрузка опороспособной культы, полная разгрузка неопороспособной культы и сохранение энергии в цикле шага за счет упругой деформации пружинных элементов.

Конструкция ПНК должна обеспечивать устойчивость пользователя в статическом и динамическом состоянии в сагиттальной (плоскость, разделяющая тело на левую и правую части) и фронтальной плоскостях. Однако устойчивость при взаимодействии с наклонными плоскостями более 7° крайне низкая. Для обеспечения устойчивости в пружинных элементах делают продольную прорезь, обеспечивающую возможность смещения опорных поверхностей относительно друг друга.

Протез стопы состоит из элементов, представленных на рис. 1.



**Рис. 1.** Принципиальная схема пассивно-функционального протеза стопы:

1 – адаптер; 2 – съемная анатомическая оболочка;

3 – пяточный пружинный элемент;

4 – основной пружинный элемент; 5 – крепежный элемент

**Figure 1.** The composition

of the passive-functional prosthetic foot:

1 – adapter; 2 – removable anatomical shell; 3 – heel spring element;

4 – main spring element; 5 – fastening element

<sup>3</sup> K levels. URL: <https://assets.ossur.com/library/31999> (accessed: 05.03.2021)

Адаптер, как правило, сделан из стали или титана, как и крепежные элементы. Съемную анатомическую оболочку изготавливают из полиуретана, пружинные элементы чаще всего – из композиционных материалов, таких как стеклопластики или углепластики.

## 2. Концепция и моделирование напряженного состояния новой конструкции

### 2.1. Проектный облик концептов конструкции протеза стопы

На основе изучения конструкций существующих протезов нижних конечностей было сформировано несколько вариантов конструкции.

Конструкция 2 (рис. 2) представляет собой аналог стопы высокого профиля<sup>4</sup> от компании Freedom Innovations<sup>5</sup> с симметричными пружинными элементами, имеющими большую толщину, и расширенным завершением пяточных пружинных элементов.



**Рис. 2.** Конструкция 2  
**Figure 2.** Structure 2

Конструкция 3 (рис. 3) является низкопрофильной стопой с тремя продольными прорезями в области мыска для стабилизации конструкции на наклонных поверхностях. Конструкция основного пружинного элемента имеет переменную толщину, необходимую для обеспечения плавности переката стопы при шаге.

<sup>4</sup> Уровень ампутации. URL: <https://www.ottobock-export.com/ru/prosthetics/information-for-amputees/from-amputation-to-rehabilitation/amputation-level/> (дата обращения: 05.03.2021).

<sup>5</sup> Freedom Agilix by PROTEOR. URL: <https://www.freedom-innovations.com/agilix/> (accessed: 10.04.2021).



**Рис. 3.** Конструкция 3  
**Figure 3.** Structure 3

В качестве наиболее перспективной из представленных была выбрана конструкция 3, так как обеспечение стабильности пользователя при перемещении по наклонным опорным поверхностям и пересеченной местности является одной из приоритетных задач современных протезов.

## 2.2. Формулировка модели. Финальный концепт

В настоящей работе финальная концепция конструкции протеза сформулирована с учетом анализа характерных особенностей современных протезов стопы, а также двух новых конструкций. Сделан вывод, что оптимальным решением является низкопрофильная стопа (до 80 мм в высоту), так как она универсальна для любого уровня ампутации.



**Рис. 4.** Конструкция 4  
**Figure 4.** Structure 4

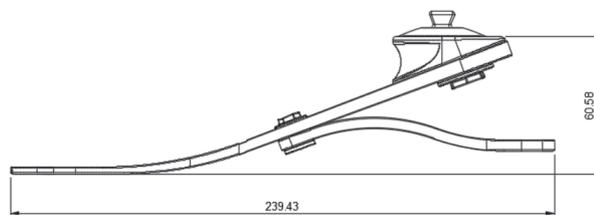
Стопа должна иметь переменную толщину пружинных элементов для обеспечения более плав-

ной плантарфлексии (сгибания стопы) и дорсифлексии (разгибания стопы). Необходимо обеспечить устойчивость пользователя на плоских, наклонных и неровных поверхностях. Необходимы три продольных прорези в основном пружинном элементе, одна из которых должна немного не доходить до адаптера, для обеспечения большей подвижности протеза стопы, пяточный элемент также должен содержать прорезь. Основной пружинный элемент должен иметь антропоморфное расширение в области мыска для дополнительной устойчивости.

Финальная конструкция 4 представлена на рис. 4. Высота стопы составляет 61 мм, длина – 239 мм (для стопы 25 размера). Ориентировочная масса с соединительными элементами – 323 г.

## 2.3. Результаты моделирования и их анализ

Расчетная модель базируется на сравнительном анализе четырех конструкций, имеющих одинаковые габаритные размеры (рис. 5), но различное строение продольных прорезей на основном и пяточном пружинных элементах.



**Рис. 5.** Габаритные размеры финальной конструкции  
**Figure 5.** Scales of final structure

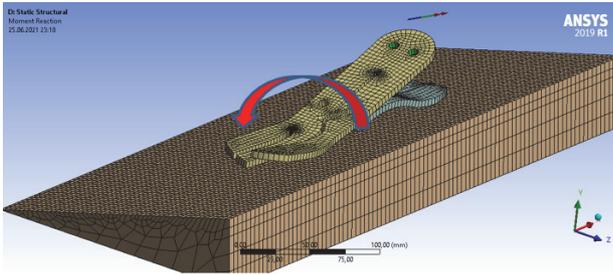
Для получения расчетных данных используется имитация воздействия протеза стопы на твердую наклонную поверхность, созданная в программном комплексе ANSYS [9].

Конструкция 1, не имеющая продольных прорезей, и конструкция 2, имеющая одну центральную продольную прорезь, являются аналогами существующих стоп.

Конструкции 3 и 4, имеющие нестандартные прорези, являются основными объектами исследования.

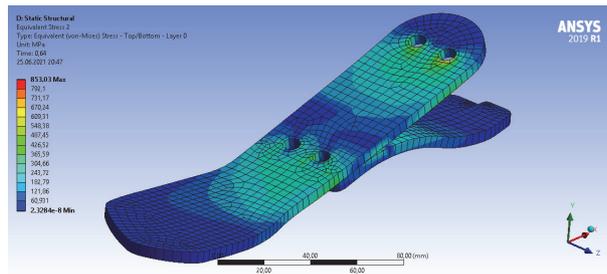
Для расчета были созданы виртуальные модели с пружинными элементами равной толщины – 5 мм (с целью упрощения расчетной модели) и фрагмент наклонной поверхности (угол наклона 15°).

В качестве материала для расчета пружинных элементов выбран углепластиковый препрег (390 ГПа). Расположение волокон в каждом слое однонаправленное, слои ориентированы друг относительно друга под углом 90° [10; 11]. Конструкция формируется приблизительно из 10 слоев препрега.



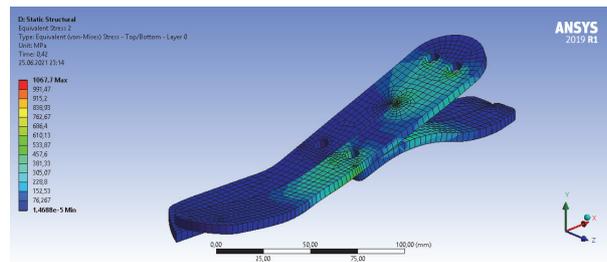
**Рис. 6.** Момент в фронтальной плоскости  
**Figure 6.** Moment in frontal plane

Конструкция 1. Реакция опоры: 1302,6 Н. Момент во фронтальной плоскости: 21 787 Н·мм.



**Рис. 7.** Эквивалентное напряжение  
**Figure 7.** Equivalent stress

Конструкция 2. Реакция опоры: 1303,0 Н. Момент во фронтальной плоскости: 14 108 Н·мм.

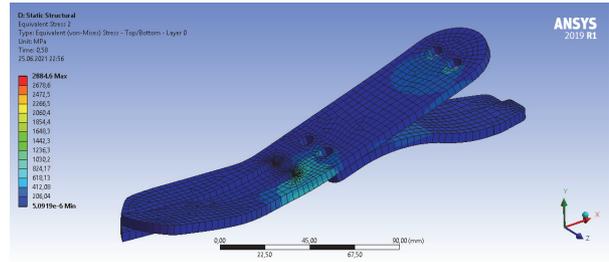


**Рис. 8.** Эквивалентное напряжение  
**Figure 8.** Equivalent stress

Конструкция 3. Реакция опоры: 1326,8 Н. Момент во фронтальной плоскости: 12 339 Н·мм.

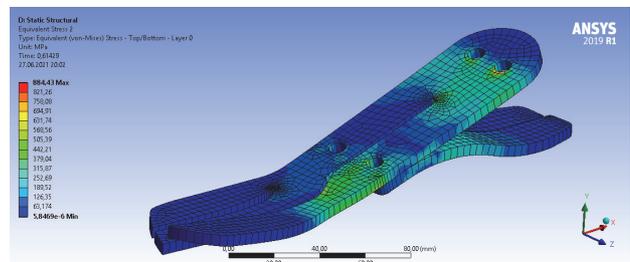
Для симуляции взаимодействия протеза с наклонной поверхностью смоделировано перемеще-

ние протеза стопы относительно вертикальной оси, что приводит к визуализации деформированного состояния. На основе полученных значений реакции опоры выбирались оптимальная итерация расчета и проводился анализ момента, возникающего в месте крепления адаптера (рис. 6). В данном моделировании значения имеют относительный характер, предназначенный для демонстрации работоспособности конструкций.



**Рис. 9.** Эквивалентное напряжение  
**Figure 9.** Equivalent stress

Конструкция 4. Реакция опоры: 1325,7 Н. Момент во фронтальной плоскости: 12 083 Н·мм.



**Рис. 10.** Эквивалентное напряжение  
**Figure 10.** Equivalent stress

**Результаты компьютерного моделирования**

Номер конструкции	Реакция опоры Н	Момент, Н·мм
1 базовая	1302,6	21 787
2 базовая	1303,0	14 108
3 новая	1326,8	12 339
4 новая	1325,7	12 083

**Simulation results**

Structure's number	Force reaction N	Moment, N-mm
1 basic	1302.6	21 787
2 basic	1303.0	14 108
3 new	1326.8	12 339
4 new	1325.7	12 083

При сравнении результатов из таблицы можно увидеть, что конструкция 1, существующая на рынке, дает наибольший момент в области крепления адаптера.

Конструкция 2, существующая на рынке и имеющая одну прорезь, дает значительно меньшее значение момента относительно конструкции 1.

В разработанной конструкции 3 момент стал еще меньше за счет двух прорезей на мыске.

Наименьшая величина момента наблюдается у разработанной конструкции 4, имеющий одну длинную прорезь и одну короткую прорезь на мыске. Это означает, что нагрузка на культю пользователя будет значительно ниже, что позволит повысить комфорт передвижения.

## Заключение

В настоящее время область протезирования нижних конечностей является перспективной.

Разработанная конструкция протеза универсальна, что увеличивает количество пользователей и позволяет расширить возможности людей, использующих ПНК.

С помощью метода конечных элементов проведено численное моделирование напряженно-деформированного состояния протезов – определены значения силы и момент реакции опоры при взаимодействии конструкций протезов с поверхностью с углом наклона 15°. Выбран рациональный вариант конструкции.

Получены результаты, подтверждающие работоспособность и перспективность разработанной конструкции протеза – предложенный вариант на 44,5 % эффективнее самой распространенной на рынке конструкции без прорезей и на 14,4 % эффективнее конструкции с одной прорезью.

## Список литературы

1. Якобсон Я.С., Кузнецкин А.П., Самойлов Д.В., Шишкин Б.В. Энергосберегающие протезы нижних конечностей // Российский журнал биомеханики. 1999. Т. 3. № 2. С. 129.
2. Осипенко М.А., Няшин Ю.И., Рудаков Р.Н. Математическое моделирование и оптимизация конструкции упругого элемента протеза стопы // Российский журнал биомеханики. 1999. Т. 3. № 2. С. 87–88.
3. Неврюев Д.А. Усовершенствование конструкции протеза стопы // Технология и переработка современных полимерных материалов: сборник трудов

Всероссийской научно-практической конференции: в 3 т. Т. 3. 2017. С. 63–66.

4. Неврюев Д.А., Шестопалов В.И., Улданов А.Г., Суханов А.И. К вопросу модернизации конструкции протеза стопы // Тенденции развития науки и образования. 2017. № 33–1. С. 47–49. <https://doi.org/10.18411/lj-25-12-2017-18>

5. Song Y. Performance test for laminated-type prosthetic foot with composite plates // Int. J. Precis. Eng. 2019. Vol. 20. No. 10. Pp. 1777–1786. <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00156-3>

6. Abbas S.M., Resan K.K., Muhammad A.K., Al-Waily M. Mechanical and fatigue behaviors of prosthetic for partial foot amputation with various composite materials types effect // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. Vol. 9. No. 9. Pp. 1–8.

7. Zou D., He T., Dailey M., Smith K., Silva M.J., Sinacore D.R., Mueller M.J., Hastings M.K. Experimental and computational analysis of composite ankle-foot orthosis // J. Rehabil. Res. Dev. 2014. Vol. 51. No. 10. Pp. 1525–1536.

8. Noroozi S., Sewell P., Abdul Rahman A.G., Vinney J., Chao O.Z., Dyer B. Modal analysis of composite prosthetic energy-storing-and-returning feet: an initial investigation // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part P: Journal of Sports Engineering and Technology. 2013. Vol. 227. No. 1. Pp. 39–48. <https://doi.org/10.1177/1754337112439274>

9. ANSYS Composite PrepPost User's Guide. Cansonsburg, 2013. 370 p.

10. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 1998. 516 с.

11. Батаев А.А., Батаев В.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 384 с.

## References

1. Yakobson YaS, Kuzhekin AP, Samoilov DV, Shishkin BV. Energy safety in prosthetic feets. *Russian Journal of Biomechanics*. 1999;3(2):129. (In Russ.)
2. Osipenko MA, Nyashin YI, Rudakov RN. Mathematic simulation and optimization of prosthetic feet construction. *Russian Journal of Biomechanics*. 1999;3(2): 87–88. (In Russ.)
3. Nevruiev D. Modernization of prosthetic feet construction. *Technology and Processing of Modern Polymer Materials: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2017;3:63–66. (In Russ.)
4. Nevruiev D, Shestopalov V, Uldanov A. *The question of modernization of prosthetic feet construction*. 2017; (33–1):47–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.18411/lj-25-12-2017-18>

5. Song Y. Performance test for laminated-type prosthetic foot with composite plates. *Int. J. Precis. Eng.* 2019;20(10):1777–1786. <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00156-3>

6. Abbas SM, Resan KK, Muhammad AK, Al-Waily M. Mechanical and fatigue behaviors of prosthetic for partial foot amputation with various composite materials types effect. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018;9(9):1–8.

7. Zou D, He T, Dailey M, Smith K, Silva MJ, Sinacore DR, Mueller MJ, Hastings MK. Experimental and computational analysis of composite ankle-foot orthosis. *J. Rehabil. Res. DeV.* 2014;51(10):1525–1536.

8. Noroozi S, Sewell P, Abdul Rahman AG, Vinney J, Chao OZ, Dyer B. Modal analysis of com-

posite prosthetic energy-storing-and-returning feet: an initial investigation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*. 2013;227(1):39–48. <https://doi.org/10.1177/1754337112439274>

9. ANSYS Composite PrepPost User's Guide. Canonsburg; 2013.

10. Bulanov IM, Vorobey VV. *Technology of rocket and aerospace structures made of composite materials*. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ.; 1998. (In Russ.)

11. Bataev AA, Bataev VA. *Composite materials: structure, receipt, application*. Novosibirsk: NSTU Publ.; 2002. (In Russ.)

### Сведения об авторах

*Борисов Иван Михайлович*, бакалавр, магистрант кафедры СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1. ORCID: 0000-0003-2347-7306. E-mail: dvsgood@gmail.com

*Резник Сергей Васильевич*, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой СМ13 «Ракетно-космические композитные конструкции», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1. ORCID: 0000-0002-4837-6993, Scopus ID: 7005971925, eLIBRARY SPIN-код: 1000-3828. E-mail: sreznik@bmstu

### About the authors

*Ivan M. Borisov*, bachelor, master's student of the Department SM13 "Rocket and Space Composite Structures," Bauman Moscow State Technical University, 5 2-ya Baumanskaya St, bldg 1, Moscow, 105005, Russian Federation. ORCID: 0000-0003-2347-7306. E-mail: dvsgood@gmail.com

*Sergey V. Reznik*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department SM13 "Rocket and Space Composite Structures," Bauman Moscow State Technical University, 5 2-ya Baumanskaya St, bldg 1, Moscow, 105005, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-4837-6993, Scopus ID: 7005971925, eLIBRARY SPIN-code: 1000-3828. E-mail: sreznik@bmstu



DOI 10.22363/2312-8143-2021-22-4-355-363  
УДК 65.011.56

Научная статья / Research article

## На пути к автономному судоходству

А.Б. Володин , С.В. Преснов , В.В. Якунчиков  

*Российский университет транспорта, Москва, Россия*  
✉ shneider1969@mail.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 19 июля 2021 г.  
Доработана: 17 ноября 2021 г.  
Принята к публикации: 17 ноября 2021 г.

### Ключевые слова:

автономное судоходство, технические аспекты внедрения, сокращение экипажей судов, зарубежный опыт, национальные программы

**Аннотация.** Рассматриваются национальные аспекты готовности и задачи внедрения автономного (беспилотного) судоходства в ближайшей перспективе. Цель исследования – определить экономические выгоды и риски, проблемные места внедрения технологий автономного судоходства. Экономическая выгода базируется на снижении затрат на оплату экипажа судна, его проживания на борту, сокращения убытков от аварий. Если на вопрос «что?» уже дан ответ – установка систем автономного судовождения доступна для морских судов уже сегодня, то вопрос «зачем?» пока не решен. При условии, что основная выгода предполагается от сокращения экипажа, заметное сокращение возможно только для вновь строящихся и относительно современных судов с уровнем автоматизации не ниже AUT2, доля которых под флагом морского коммерческого флота РФ составляет около 15 %. Вместе с тем модернизация существующих судов внутреннего водного плавания в автономные доступна сегодня для менее чем 2 % речного транспортного флота (суда с уровнем автоматизации А1), следовательно, автономный внутренний водный транспорт лишь предстоит построить. К рискам стоит отнести медленный темп постройки новых судов, а также переучивание и дальнейшее трудоустройство при массовом сокращении экипажей судов. Проанализирован зарубежный и отечественный опыт начального этапа внедрения автономного судоходства.

### Для цитирования

Володин А.Б., Преснов С.В., Якунчиков В.В. На пути к автономному судоходству // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 4. С. 355–363. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-4-355-363>

## On the way to autonomous navigation

Alexey B. Volodin , Sergey V. Presnov , Vladimir V. Yakunchikov  

*Russian University of Transport, Moscow, Russia*  
✉ shneider1969@mail.ru

### Article history

Received: July 19, 2021  
Revised: November 17, 2021  
Accepted: November 25, 2021

**Abstract.** The national aspects of readiness and the tasks of introducing autonomous (unmanned) navigation in the near future are considered. The purpose of the study – identification of economic benefits and risks, problem areas of implementation of autonomous navigation technologies.

© Володин А.Б., Преснов С.В., Якунчиков В.В., 2021



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**Keywords:**

autonomous shipping, technical aspects of implementation, reduction of ship crews, foreign experience, national programs

The economic benefit is based on a reduction in the costs of paying the crew of the ship, living on board it, reducing losses from accidents. If the question “what?” has already been answered – the installation of autonomous navigation systems is available for naval vessels today, then the question “why?” has not yet been resolved. If the main benefit is expected from a reduction in crew, then a noticeable reduction in crew is possible only for newly built and relatively modern vessels with an automation level of at least AUT2, the share of which under the flag of the Russian Navy is about 15%. At the same time, the modernization of existing inland navigation vessels into autonomous vessels is now available for less than 2% of the river transport fleet (vessels with an automation level of A1), which suggests that autonomous inland water transport only has to be built. The risks also include the slow pace of construction of new ships, as well as retraining and further employment with a massive reduction in the crew of ships. Foreign and domestic experience of the initial stage of autonomous navigation implementation is considered.

**For citation**

Volodin AB, Presnov SV, Yakunchikov VV. On the way to autonomous navigation. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(4):355–363. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-4-355-363>

**Введение**

Сегодня глобальный исследовательский интерес к области морских автономных надводных кораблей (MASS) резко возрастает [1; 2].

Мир уже работает над созданием автоматизированных кораблей, и это не новая идея на морском транспорте, но появление автономных кораблей влечет за собой целый ряд юридических проблем [3].

Экономические вопросы также не полностью решены. Прогнозируемый диапазон экономической целесообразности построения широкополосных каналов связи для передачи данных – 2026–2041 гг., в то время как стоимость автоматизированной обработки грузов достигнет нынешнего уровня расходов где-то между 2037 и 2101 гг. Наконец, стоимость среднеоборотного дизельного двигателя и двигателя на топливных элементах сравняется ориентировочно между 2025 и 2060 гг. [4].

Важным требованием для эксплуатации MASS является то, что они должны быть как минимум такими же безопасными, как и обычные корабли [5], главным образом за счет снижения так называемого человеческого фактора, признаваемого сегодня ключевой причиной аварий на водном транспорте [6].

Ведущими в мировых исследованиях сегодня являются норвежские [7], китайские [8], финские разработки [9], включающие как технические, так и логистические инновации. Например, концепция Vessel Train предусматривает использование обычного (экипажного) ведущего головного судна, за которым следует караван автономных [10].

Для применения беспилотных технологий на транспорте в России сегодня также созрели все технологические предпосылки, и в ближайшем будущем, после снятия нормативных ограничений и принятия соответствующих национальных и международных документов, станет возможным быстрое внедрение автономного судоходства.

В настоящее время в рамках национальных проектов «разрабатываются технологии e-Навигации и a-Навигации, направленные на обеспечение лидерских позиций страны на мировом рынке»<sup>1</sup>.

При этом подразумевается трансформация профессии моряка в офисную работу за автоматизированным рабочим местом, когда необходимость выходить в морские рейсы отпадет, а управление судами будет происходить удаленно [11].

После внедрения автономных систем судовождения экипажи фактически будут переведены на сушу, что обеспечит не только экономию фонда заработной платы, но и существенное упрощение конструкции судов, увеличение полезного объема под грузы. «Все жилые и вспомогательные помещения обеспечения жизнедеятельности экипажа будут упразднены, что приведет к уменьшению водоизмещения судна с сохранением прежней грузоподъемности и дополнительной экономии топлива. Но самым главным станет безопас-

<sup>1</sup> Проект-маяк «Автономное судовождение» в рамках перечня инициатив социально-экономического развития Российской Федерации до 2030 года, утвержденного распоряжением Правительства РФ от 06.10.2021 г. URL: <http://static.government.ru/media/files/jwsYsyJKWGQQAaCSMGrd7q82RQ5xECo3.pdf> (дата обращения: 22.06.2021).

ность (берегового) экипажа, переход от высокой интенсивности труда при круглосуточных вахтах к 8-часовому рабочему дню<sup>2</sup>».

## 1. Экономические аспекты

Экономическая выгода для судовладельца базируется на сокращении численности персонала, обеспечивающего движение судна и отмене затрат по обеспечению экипажа на борту судна. Доля оплаты труда экипажей судов в международных морских перевозках в зависимости от класса и флага судна, а также типа перевозок составляет от «30 % (контейнеровозы, крупные суда)» до «70 % (портовые буксиры, малые суда)» от прямых расходов на перевозки<sup>3</sup>, на ВВТ от 30 до 50 %.

По оценкам Минтранса, «снижение эксплуатационных расходов сократит рейсовые расходы судоходных компаний при переходе на а-Навигацию ориентировочно на 5 %. Совокупная себестоимость морских перевозок в России оценивается в 500 млрд руб. в год, что даст эффект в 25 млрд руб. в год»<sup>4</sup>.

Однако, массовое сокращение экипажей судов потребует их переучивания и трудоустройства.

Также важным плюсом автоматизации прогнозируется снижение на 80 % аварийности за счет уменьшения влияния человеческого фактора при управлении судами. «Убытки судоходных компаний от инцидентов на море, связанных с человеческим фактором, превышают 1,5 млрд долл. США в год (Allianz Global Corporate & Specialty AG, 2018). Оценка аналогичных убытков российских судовладельцев составляет 1,2 млрд руб. в год. Не менее 50 % таких инцидентов могут быть предотвращены благодаря использованию а-Навигации и е-Навигации, что составит 600 млн руб. в год предотвращенного ущерба»<sup>5</sup>.

<sup>2</sup> Goodbye high seas, hello cubicle. Sailor – the next desk job. URL: [https://money.cnn.com/2017/05/19/technology/autonomous-ships-sailor-desk-job/index.html?section=money\\_technology/](https://money.cnn.com/2017/05/19/technology/autonomous-ships-sailor-desk-job/index.html?section=money_technology/) (accessed: 22.09.2021).

<sup>3</sup> Проект-маяк «Автономное судовождение» в рамках перечня инициатив социально-экономического развития Российской Федерации до 2030 года, утвержденного распоряжением Правительства РФ от 06.10.2021 г. URL: <http://static.government.ru/media/files/jwsYsyJKWGQQAaCSMGrd7q82RQ5xECo3.pdf> (дата обращения: 22.06.2021).

<sup>4</sup> Там же.

<sup>5</sup> Там же.

Также после быстрого успешного внедрения станет возможным экспорт российских технологий и продуктов в данной области.

## 2. Технические аспекты

Для морских судов системы автоматического управления движением в открытом море уже созданы. Например, компания «Ситроникс КТ» за последние 2 года в рамках опытно-конструкторской работы (ОКР) «а-Навигация» создала систему для оснащения автономных морских судов. «Концепция а-Навигации – это совокупность технологий искусственного интеллекта, математического моделирования, распознавания и идентификации, позволяющая заменить человека в управлении судном»<sup>6</sup>. Разработка позволяет конвертировать в автономные не только вновь строящиеся, но и действующие суда.

По заявлению производителей, установка такой системы не потребует докования флота и может быть произведена в сравнительно малое время при относительно небольших капитальных затратах.

Вместе с тем большинство компонентов существующих систем состоит из импортных комплектующих, и одной из ближайших задач является перевод всей компонентной базы на отечественную.

Береговая морская инфраструктура автономного судоходства опирается на созданную тестовую акваторию е-Навигации (ОКР «е-Море») и существующие электронные навигационные карты морских районов и акваторий, которыми пользуются все морские коммерческие суда («1176 единиц»<sup>7</sup>).

Необходимо дальнейшее совершенствование систем управления движением судов (СУДС), ГМССБ и АИС нового поколения на основе е-Навигации, средств автономного судовождения в порту для автоматической проводки и швартовки.

Необходимо также оснащение портов диспетчерскими дистанционным управлением флотом, для чего «потребуется развертывание дополнительных группировок спутников в районах

<sup>6</sup> Проблемы и перспективы безэкипажных судов. URL: <https://www.sitronics.com/news/view/news-49-10-06-2021.html> (дата обращения: 19.08.2021).

<sup>7</sup> Весь морской флот России. URL: <https://portnews.ru/comments/2940/> (дата обращения: 19.06.2021).

эксплуатации автономных судов, сетей беспроводной связи стандартов WiMAX в акваториях и на подходах к портам»<sup>8</sup>.

Также в местах остановок автономного флота (порты, рейды) потребуется наличие ремонтно-диагностических бригад для осмотра, диагностики и наладки СЭУ и систем автоматики судна.

На маршрутах следования автономных судов потребуется доступ аварийных бригад быстрого реагирования с использованием вертолетного транспорта.

При наличии надежной спутниковой связи (доступ к спутниковым данным группировок GPS/GLONASS/BAIDOO и др.), а также нормально функционирующих систем видеораспознавания на судне эксплуатация флота практически не потребует визуальную навигационную обстановку (буи, бакены, маяки).

Для вновь строящихся судов должна быть конструктивно предусмотрена система автоматического приема и выдачи горюче-смазочных материалов и нефтесодержащих вод.

Технические средства автоматизации швартовки/постановки на якорь только предстоит разработать, и сегодня в этом направлении идут активные работы (Япония, Финляндия).

Технические аспекты на внутреннем водном транспорте схожи с морской спецификой, и система навигации морских судов также может быть доработана для применения на речных судах. Это потребует учета движения и расхождения судов в узкостях, малых задержек в системе управления, при необходимости – установки дополнительных подруливающих средств [11].

Так же как и для морского флота, установка системы управления судном не потребует слипования флота и может быть произведена в сравнительно малое время, речные порты нужно будет оснастить пунктами дистанционного управления судами, а в местах остановок автономного флота (порты, бункеровочные стоянки, шлюзы) потребуется наличие ремонтно-диагностических бригад для осмотра, диагностики и наладки СЭУ и систем автоматики судна.

Береговая инфраструктура ВВТ уже сегодня опирается на Единую коллекцию электронных навигационных карт внутренних водных путей РФ (ОКР «Карта-Река»), которые активно формируются.

### 3. Сокращение численности экипажей

Снижение эксплуатационных расходов за счет сокращения экипажей уже на первом этапе сократит рейсовые расходы судоходных компаний ориентировочно на 5–10 %.

Доля оплаты труда экипажей судов в международных морских перевозках зависят от класса и флага судна, типа перевозок, но прежде всего – от объема груза (размеров судна).

Для малых судов доля заработной платы в операционных расходах доходит до «50–70 % (портовые буксиры, малые суда, технический флот), для крупных судов она гораздо меньше – начинается от 6 % (контейнеровозы, крупные суда)» [12]. Аналогичная картина в национальном (российском) сегменте судоходства – доля заработной платы в расходах судовладельцев составляет около 5 %.

Затраты на обеспечение работы судна составляют 42 %, рейсовые расходы, включая бункеровку, составляют еще 40 %. В этом смысле судоходство является более капиталоемким, чем трудоемкими бизнесом [13].

При установке на суда систем автономного управления движением станет возможно сокращение части экипажа команды мостика уровня эксплуатации (вахтенный рулевой), уровня управления (вахтенный офицер).

Сокращать экипаж машинной команды на действующих судах будет возможно при наличии на судне уровня автоматизации не ниже AUT1, в некоторых случаях AUT2.

Согласно требованиям морского Регистра:

– если объем автоматизации позволяет эксплуатацию механической установки судна без постоянного присутствия обслуживающего персонала в машинных помещениях и центральном посту управления;

– автоматизация выполнена с применением компьютеров или программируемых логических контроллеров, отвечающих требованиям раздела 7 части XV «Автоматизация»;

– автоматизация выполнена с применением компьютерной интегрированной системы управ-

<sup>8</sup> Проект-маяк «Автономное судовождение» в рамках перечня инициатив социально-экономического развития Российской Федерации до 2030 года, утвержденного распоряжением Правительства РФ от 06.10.2021 г. URL: <http://static.government.ru/media/files/jwsYsyJKWGQQAaCSMGrd7q82RQ5xEC03.pdf> (дата обращения: 22.06.2021).

ления и контроля, отвечающей требованиям раздела 7 части XV «Автоматизация».

В этом случае возможно сокращение части экипажа уровня эксплуатации (вахтенный моторист) и уровня управления (вахтенный офицер).

Сокращение матросов (или лиц, выполняющих якорно-швартовные операции) будет возможно только с появлением на судах систем автоматизации швартовых/стояночных операций.

Сокращение экипажей действующих судов внутреннего водного плавания будет возможно при наличии на судне уровня автоматизации не ниже А1 (безвахтенное машинное отделение) и оснащении автоматикой швартовно-стояночных операций. В этом случае допустимо сокращение части экипажа уровня эксплуатации (рулевой-моторист, матрос), уровня управления (помощники механика, помощники капитана).

#### 4. Действующие российские программы и проекты

С конца 2020 г. находится на рассмотрении в правительстве проект постановления Правительства РФ от 5 декабря 2020 г. № 2031 «О проведении эксперимента по опытной эксплуатации автономных судов под Государственным флагом Российской Федерации», вместе с тем мероприятия эксперимента уже реализуются. Так, на расширенном заседании Коллегии Федерального агентства морского и речного транспорта и Общественного совета при Росморречфлоте руководитель ФАМРТ Лаврищев отметил, что «в 2020 г. стартовал эксперимент по испытанию автономных судов, создана тестовая акватория на Неве и Ладожском озере. ФГУП «Росморпорт» начал испытания оборудования, установленного на судах технического флота»<sup>9</sup>.

Пилотный проект запуска автономной линии между портами Калининград и Усть-Луга планируется в 2023 г. «До 31 декабря 2025 г. эксперимент пройдет также в Петербурге, Ленинградской, Астраханской, Магаданской, Мурманской, Ростовской, Сахалинской областях, а также в Краснодарском, Приморском и Хабаровском краях»<sup>10</sup>.

<sup>9</sup> Глобальные цели, амбициозные задачи. URL: <http://morvesti.ru/analitika/1692/89716/> (дата обращения: 25.09.2021).

<sup>10</sup> Акт Правительства Российской Федерации от 05.12.2020 г. № 2031 «О проведении эксперимента по опытной эксплуатации автономных судов под Государственным флагом

В рамках федеральной целевой программы «ГЛОНАСС» компания «Кронштадт Технологии» выполнила два важных государственных контракта по заказу Минтранса России, завершив создание тестовой акватории e-Навигации (ОКР «e-Море») и формирование Единой коллекции электронных навигационных карт внутренних водных путей РФ (проект «Карта-Река»).

Опытно-конструкторская работа «e-Море» выполнялась группой компаний «Кронштадт» с 2016 по 2020 г. и заключалась в создании тестовой акватории, обеспечивающей всестороннюю проверку и отработку разрабатываемых навигационных, связанных, информационных систем и комплексов судовой и береговой иерархической инфраструктуры в рамках глобальной концепции e-Навигации. Целью работы являлось повышение безопасности мореплавания и судоходства на водных путях Российской Федерации, а также рост эффективности морских перевозок. В результате выполненных работ «Минтранс России получил „полигон“ для отработки и тестирования цифровых решений, на котором будут аккумулироваться ведущие разработки для безэкипажного коммерческого судоходства»<sup>11</sup>.

В мае 2021 г. межведомственная рабочая группа при правительственной комиссии по модернизации экономики и инновационному развитию России одобрила финансирование проекта госпрограммы Национальной технологической инициативы в области создания платформы виртуального моделирования безэкипажного судоходства в размере «263 млн руб.»<sup>12</sup>.

Проект выполняет компания «Кронштадт Технологии», соисполнителями являются ФГУП «Крыловский государственный научный центр» и научно-производственное предприятие «Авиационная и морская электроника». В апреле этого года группу разработчиков из «Кронштадт Технологии», занимающуюся морскими беспилотниками, купила АФК «Система».

Российской Федерации» // Собрание актов Президента и Правительства Российской Федерации. № 2031. Федерации. № 2031. URL: <http://government.ru/docs/all/131362/> (дата обращения: 22.05.2021).

<sup>11</sup> Кронштадт создал тестовую акваторию. URL: <https://portnews.ru/news/304186/> (дата обращения: 22.05.2021).

<sup>12</sup> Власти РФ поддержат создание виртуальной платформы для беспилотного судоходства. URL: [https://neftgaz.ru/news/gosreg/443328-rossiya-okazhet-podderzhku-sozdaniyu-virtualnoy-platforny-dlya-bespilotnogo-sudovozhdeniya/?clear\\_cache=Y](https://neftgaz.ru/news/gosreg/443328-rossiya-okazhet-podderzhku-sozdaniyu-virtualnoy-platforny-dlya-bespilotnogo-sudovozhdeniya/?clear_cache=Y) (дата обращения: 19.06.2021).

Компания Sitronics Group (входит в АФК «Система») позиционирует себя на третьем месте в мировом рейтинге разработчиков технологий автономного судоходства и «планирует инвестировать в этом году в данной области 700 млн руб.»<sup>13</sup>.

Сегодня компанией создан комплекс систем для автономного судовождения в технической и программной части, оснащены четыре судна коммерческого и технического флота, проходит опытная эксплуатация решения в реальных условиях.

Система автономного судовождения Sitronics Group номинирована на российскую независимую деловую премию в области цифровых технологий в категории «Разработка года».

## 5. Международные усилия

Стратегический план Международной морской организации (ИМО) на 2018–2023 гг. включает «ключевое стратегическое направление „Интегрирование новых и передовых технологий в нормативно-правовую базу“» [14].

В 2017 г. по предложению ряда государств-членов Комитет ИМО по безопасности на море (КБМ) согласился включить в свою повестку дня вопрос о морских автономных надводных судах. Это было сделано для определения того, каким образом безопасная и экологически обоснованная эксплуатация морских автономных надводных судов (МАСС) может быть включена в документы ИМО.

КБМ признал, что ИМО следует играть упреждающую и ведущую роль с учетом быстрых технологических изменений, связанных с внедрением коммерческих судов в автономном режиме (работающих без экипажа).

В июне 2019 г. КБМ на своей 101 сессии утвердил Временные руководящие принципы испытаний морских автономных надводных судов (MASS).

Среди прочего, в руководящих принципах говорится, что судебные разбирательства должны проводиться способом, обеспечивающим по меньшей мере такую же степень безопасности и защиты окружающей среды, как это предусмотрено соответствующими документами.

Бортовые или удаленные операторы MASS должны иметь соответствующую квалификацию

для их эксплуатации. «Любой персонал, участвующий в испытаниях, как дистанционных, так и бортовых, должен иметь соответствующую квалификацию и опыт для безопасного проведения испытаний»<sup>14</sup>.

С 4 по 8 октября 2021 г. в формате видеоконференции прошла 104-я сессия Комитета по безопасности на море Международной морской организации (КБМ104)<sup>15</sup>.

В мероприятии приняла участие межведомственная делегация Российской Федерации во главе с директором департамента государственной политики в области морского и внутреннего водного транспорта Минтранса России Виталием Клюевым.

Успешно завершив регулятивный обзор в отношении использования морских автономных надводных судов (МАНС), а именно оценки необходимости внесения изменений в конвенции и кодексы ИМО для обеспечения возможности использования автономных судов, комитет рассмотрел несколько предложений государств о дальнейшей работе по этому направлению.

Российская Федерация представила на КБМ104 два документа с предложениями приступить к разработке инструмента ИМО по МАНС. Также, учитывая итоги регулятивного обзора, на первом этапе предложено отдать приоритет рекомендательным руководствам по МАНС, чтобы дать возможность судоходной индустрии уже в ближайшее время приступить к эксплуатации автономных судов.

Уже на следующей сессии года начнется прикладная работа с прицелом на разработку международного кодекса по МАНС обязательного характера к 2025 г.

*Англия.* Компания Rolls-Royce с 2012 г. разрабатывает концепцию автоматизированных судов, причем оценивает разработку автоматизируемых судов как огромный шаг в уменьшении травматизма на море<sup>16</sup>.

<sup>14</sup> Документы Международной морской организации ИМО. URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx> (дата обращения: 26.06.2021).

<sup>15</sup> Документы Министерства транспорта РФ. URL: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/10056> (дата обращения: 28.06.2021).

<sup>16</sup> Remote and autonomous ship – the next step. URL: <https://www.rolls-royce.com/media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/marine/ship-intel/aawa-whitepaper-210616.pdf> (accessed: 12.04.2021).

<sup>13</sup> Господдержка может нарушить естественный процесс. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4849121> (дата обращения: 22.05.2021).

3 декабря 2018 г. Rolls-Royce совместно с финской государственной судоходной компанией Finferries продемонстрировали «первый в мире полностью автономный автомобильный паром Falco, действующий в море к югу от города Турку (Финляндия) в ходе пробного рейса. На судне использовались сенсорные датчики и искусственный интеллект для раннего обнаружения препятствий и предотвращения столкновений с объектами»<sup>17</sup>. Судно также выполнило автоматическую швартовку с помощью недавно разработанной автономной навигационной системы. Обратный рейс осуществлялся на дистанционном управлении.

*Норвегия.* «Полностью автоматизированный контейнеровоз норвежской компании Kongsberg Gruppe уже прошел ходовые испытания и готовится к первому самостоятельному походу в конце 2021 г.»<sup>18</sup>.

Судно будет перевозить около ста контейнеров с удобрениями на расстояние до 120 км по маршруту, связывающему три морских порта в Норвегии. Его применение позволит сократить автомобильные перевозки дизельными автомобилями (до 40 тыс. рейсов грузовиков в год) при уменьшенных на порядок вредных выбросах.

*Япония.* В марте – апреле 2021 г. на причале порта Оарай проведены демонстрационные испытания новой системы причаливания и отхода от причала в автоматическом режиме. «В проекте принимали участие компании Mitsui E&S Shipbuilding Co., Ltd. (MES-S), Mitsui O. S. K. Lines, Ltd. (MOL), Токийский университет морских наук и технологий, компания Akishima Laboratories Inc. и паромный оператор MOL Ferry Co., Ltd. [15].

Испытания проводились с участием крупного автомобильного парома Sunflower Shiretoko (MOL Ferry), валовым тоннажем 11 тыс. т на рабочем маршруте с использованием действующего причала»<sup>19</sup>. Применяя виртуальные и реальные данные, система будет доводиться на действующих причалах с участием других типов судов с целью разработки универсальной технологии.

<sup>17</sup> Rolls-Royce и Finferries испытали первый в мире полностью автономный паром. URL: <https://portnews.ru/news/268729/> (дата обращения: 25.10.2021).

<sup>18</sup> YARA Birkeland – autonomous ship project. 2020. URL: <https://www.kongsberg.com/maritime/support/themes/autonomous-ship-project-key-facts-about-yara-birkeland/> (accessed: 12.04.2021).

<sup>19</sup> Japanese demonstration of autonomous docking system. URL: <https://www.maritime-executive.com/article/video-japanese-demonstration-of-autonomous-docking-system> (accessed: 25.10.2021).

*Швеция.* Компания ABB с 2021 г. «разрабатывает передовые решения в области автономного судоходства для научно-исследовательского судна института Monterey Bay Aquarium (MBARI) на базе распределенной системы управления System 800xA, которая объединяет цифровые системы контроля, регулирования мощности, движения, низковольтные распределительные системы и системы управления судном на единой платформе, позволяющие экипажу и береговым службам получать необходимую информацию для эффективной и безопасной эксплуатации судна»<sup>20</sup>.

Также ABB «с 2020 г. разрабатывает технологические решения для сингапурской верфи Keppel Offshore & Marine для осуществления автономных буксирных операций»<sup>21</sup>.

*США.* Компания Sea Machines Robotics из США работает над системами управления военных беспилотных кораблей, созданием систем управления беспилотных аварийных кораблей, которые в составе группы смогли бы эффективно ликвидировать нефтяные пятна, разливы вредных веществ на море.

Создана «автономная система управления SM300, которая установлена на борту буксира Rachael Allen (мощностью более 5000 л.с.) компании Foss Maritime (Сиэтл, США), четвертого из нескольких новых буксиров ASD-90, строящихся компанией Nichols Brothers Boat Builders в Фриленде, штат Вашингтон.

В мае 2021 г. 90-тонный буксир Rachael Allen стал первым буксиром под флагом США, который интегрировал автономные системы в реальные коммерческие операции»<sup>22</sup>. Буксир будет работать в Калифорнии для обеспечения сопровождения танкеров.

Компания IBM разработала «корабль без экипажа Mauflower с трехуровневой технологией: сенсорные датчики, машинное обучение в реальном времени и аналитика, а также механизм

<sup>20</sup> ABB future-proofs sustainable operation of Monterey Bay ocean research vessel. URL: <https://new.abb.com/news/detail/79093/abb-future-proofs-sustainable-operation-of-monterey-bay-ocean-research-vessel> (accessed: 25.05.2021).

<sup>21</sup> ABB and Keppel O&M reach key autonomy milestone with remote vessel operation trial in Port of Singapore. URL: <https://www.hellenicshippingnews.com/abb-and-keppel-om-reach-key-autonomy-milestone-with-remote-vessel-operation-trial-in-port-of-singapore/> (accessed: 25.05.2021).

<sup>22</sup> Foss builds first U.S. tug with autonomous capabilities. URL: <https://www.maritime-executive.com/index.php/article/foss-builds-first-u-s-tug-with-autonomous-capabilities> (accessed: 25.06.2021)

принятия решений. Для обучения моделей машинного обучения использовались петабайты данных»<sup>23</sup>. Корабль должен обойти земной шар без участия человека до конца 2021 г.

Мировой альянс MASSPorts. В августе 2020 г. образован международный альянс для решения проблем и достижения согласования стандартов испытаний и эксплуатации морских автономных надводных кораблей (Maritime Autonomous Surface Ships, MASS) в портах. В состав альянса вошли Китай, Дания, Финляндия, Япония, Нидерланды, Норвегия, Республика Корея и Сингапур. Альянс также курируют ИМО, Международная ассоциация морских средств навигационного оборудования и маячных служб (IALA) и Международная ассоциация портов и гаваней (IAPH).

## Заключение

Сегодня технологии автономного судоходства разрабатывает не так много стран, и у России есть реальная возможность стать ведущей в этой области.

Снижение эксплуатационных расходов за счет сокращения экипажей уже на первом этапе сократит рейсовые расходы судоходных компаний ориентировочно на 5 %.

Системы автономного судовождения для морских судов уже доступны, а для решения оставшихся технологических вопросов в России до 2025 г. планируется завершить натурные испытания опытных морских судов на автономном управлении, что обеспечит возможность массового внедрения технологий.

Однако для эффективной модернизации действующего флота существуют серьезные ограничения. Заметное сокращение экипажа возможно только для вновь строящихся и относительно современных судов с уровнем автоматизации не ниже AUT2, доля которых под флагом морского коммерческого флота РФ составляет всего около 15 %.

Модернизация существующих судов внутреннего водного плавания в автономные доступна сегодня для менее чем 2 % речного транспортно-флота (суда с уровнем автоматизации A1), это значит, что автономный внутренний водный транспорт лишь предстоит построить.

Необходимо помнить, что массовое сокращение экипажей судов в соответствии с действующим законодательством потребует их переучивания, а при необходимости – дальнейшего трудоустройства.

## Список литературы / References

1. Fan C, Wróbel K, Montewka J, Gil M, Wan C, Zhang D. A framework to identify factors influencing navigational risk for maritime autonomous surface ships. *Ocean Eng.* 2020;202:107188. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107188>
2. Kooij C, Hekkenberg R. Identification of a task-based implementation path for unmanned autonomous ships. *Maritime Policy & Management.* 2021;1914878. <https://doi.org/10.1080/03088839.2021.1914878>
3. Vojković G, Milenković M. Autonomous ships and legal authorities of the ship master. *Case Stud. Transp. Policy.* 2020;8:333–340.
4. Kooij C, Colling AP, Benson CL. When will autonomous ships arrive? A technological forecasting perspective. *Proceedings of the International Naval Engineering Conference and Exhibition, Glasgow, UK, 2–4 October 2018.* Glasgow; 2018.
5. Thieme CA, Utne IB, Haugen S. Assessing ship risk model applicability to marine autonomous surface ships. *Ocean Eng.* 2018;165:140–154.
6. Chaal M, Banda OAV, Glomsrud JA, Basnet S, Hirdaris S, Kujala P. A framework to model the STPA hierarchical control structure of an autonomous ship. *Saf. Sci.* 2020;132:104939.
7. Akbar A, Aasen AK, Msakni M, Fagerholt K, Lindstad E, Meisel F. An economic analysis of introducing autonomous ships in a short-sea liner shipping network. *Int. Trans. Oper. Res.* 2020;28:1740–1764.
8. Lyu H, Yin Y. Fast path planning for autonomous ships in restricted waters. *Appl. Sci.* 2018;8:2592.
9. Zhang M, Montewka J, Manderbacka T, Kujala P, Hirdaris S. A big data analytics method for evaluation of ship-ship collision risk reflecting real operational conditions. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2021;213:107674.
10. Meersman H, Moschouli E, Sys C, Van der Voorde E, Vanelander T, Van Hassel E, Friedhoff B, Hekkenberg R, Hoyer K, Tenzer M. *Developing performance indicators for a logistics model for vessel platooning.* Elsevier: Amsterdam; 2020.
11. Solyakov OV, Uvarova LA, Yakunchikov VV, Nadykto NB. The model of plane-parallel ship movement based on a semi-linear system of differential equations using the perturbation method. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021; 666:052087. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/5/052087>
12. Kooij C, Hekkenberg R. The effect of autonomous systems on the crew size of ships – a case study.

<sup>23</sup> Pushing the limits of autonomous navigation with AI and automation. URL: <https://www.ibm.com/uk-en/cloud/automation/mayflower-autonomous-ship> (accessed: 21.06.2021).

*Maritime Policy & Management*. 2021;48(6):860–876. <https://doi.org/10.1080/03088839.2020.1805645>

13. Ziajka-Poznańska E, Montewka J. Costs and benefits of autonomous shipping – a literature review. *Appl. Sci.* 2021;11(10):45–53. <https://doi.org/10.3390/app11104553>

14. Li S, Fung KS. Maritime autonomous surface ships (MASS): implementation and legal issues. *Maritime*

*Business Review*. 2019;4(4):330–339. <https://doi.org/10.1108/mabr-01-2019-0006>

15. Shimizu E. Recent trends and issues for practical application of MASS. *ClassNK Technical Journal*. 2021;(3):1–11. Available from: [https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/research/rd/giho03e\\_2021.pdf](https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/research/rd/giho03e_2021.pdf) (accessed: 12.04.2021).

#### Сведения об авторах

*Володин Алексей Борисович*, кандидат технических наук, доцент, директор Академии водного транспорта, Российский университет транспорта, Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9. ORCID: 0000-0001-5202-7035, eLIBRARY SPIN-код. E-mail: [ab.volodin@mail.ru](mailto:ab.volodin@mail.ru)

*Преснов Сергей Вячеславович*, кандидат технических наук, заместитель директора научно-образовательного центра морского, внутреннего водного транспорта и технологий автономного судоходства, Российский университет транспорта, Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9. ORCID: 0000-0001-7945-3931, eLIBRARY AuthorID: 414613. E-mail: [presnov@rivreg.ru](mailto:presnov@rivreg.ru)

*Якунчиков Владимир Владимирович*, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой портовых подъемно-транспортных машин и робототехники, Российский университет транспорта, Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9. ORCID: 0000-0002-7068-6736, Scopus Author ID: 57222468159, eLIBRARY SPIN-код: 6396-4917. E-mail: [shneider1969@mail.ru](mailto:shneider1969@mail.ru)

#### About the authors

*Alexey B. Volodin*, PhD, Associate Professor, Director of the Academy of Water Transport, Russian University of Transport, 9 Obraztsova St, bldg 9, Moscow, 127994, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-5202-7035, eLIBRARY SPIN-code: 9287-1882. E-mail: [ab.volodin@mail.ru](mailto:ab.volodin@mail.ru)

*Sergey V. Presnov*, PhD, Deputy Director of the Scientific and Educational Center for Maritime, Inland Waterway Transport and Autonomous Navigation Technologies, Russian University of Transport. 9 Obraztsova St, bldg 9, Moscow, 127994, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-7945-3931, eLIBRARY AuthorID: 414613. E-mail: [presnov@rivreg.ru](mailto:presnov@rivreg.ru)

*Vladimir V. Yakunchikov*, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Port Lifting and Transport Machines and Robotics, Russian University of Transport, 9 Obraztsova St, bldg 9, Moscow, 127994, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-7068-6736, Scopus Author ID: 57222468159, eLIBRARY SPIN-code: 6396-4917. E-mail: [shneider1969@mail.ru](mailto:shneider1969@mail.ru)



DOI 10.22363/2312-8143-2021-22-4-364-372  
УДК 629.78

Научная статья / Research article

## Общепланетарное транспортное средство и космическое ожерелье «Орбита» как альтернатива ракетному освоению околоземного пространства

А.Э. Юницкий <sup>a,b</sup>, С.А. Пронкевич <sup>b,c</sup>, С.В. Артюшевский <sup>b,d</sup>✉, В.Л. Лукша <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Общество с ограниченной ответственностью «Астроинженерные технологии», Минск, Беларусь

<sup>b</sup> Закрытое акционерное общество «Струнные технологии»

<sup>c</sup> Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

<sup>d</sup> Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

✉ s.artushevskiy@unitsky.com

### История статьи

Поступила в редакцию: 19 июля 2021 г.

Доработана: 17 ноября 2021 г.

Принята к публикации: 25 ноября 2021 г.

### Ключевые слова:

экология, транспорт, биосфера, освоение космоса, безракетная индустриализация космоса, общепланетарное транспортное средство, космическое индустриальное ожерелье «Орбита», ЭкоКосмоДом

**Аннотация.** Представлена альтернатива ракетам – общепланетарное транспортное средство и космическое ожерелье «Орбита» (КИО «Орбита»), которые являются единым комплексом, необходимым для безракетного освоения ближнего космоса. Проанализирована концептуальная конструкция ОТС и КИО «Орбита», приведены их основные характеристики, сравнено воздействие ОТС и ракет-носителей на экологию Земли. Принцип движения общепланетарного транспортного средства основан на центробежных силах, возникающих при разгоне ОТС в плоскости экватора. Это основное отличие от ракетных двигателей, принцип действия которых базируется на использовании реактивного движения. Разница в принципах его работы и ракет-носителей приводит к серьезным различиям в затратах энергии, необходимой для подъема общепланетарного транспортного средства на околоземную орбиту и, соответственно, к разности стоимости тонны полезной нагрузки. Описана концепция КИО «Орбита». Комплекс должен послужить основой для выноса вредного производства на околоземную орбиту и стать стартовой площадкой для активной экспансии в космос. Заключено, что общепланетарное транспортное средство и КИО эффективны для комплексного и прогрессивного решения экологических проблем на Земле и для плодотворной реализации космического направления.

### Для цитирования

Юницкий А.Э., Пронкевич С.А., Артюшевский С.В., Лукша В.Л. Общепланетарное транспортное средство и космическое ожерелье «Орбита» как альтернатива ракетному освоению околоземного пространства // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 4. С. 364–372. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-4-364-372>



## General planetary vehicle and industrial space necklace “Orbit” as an alternative to rocket near space exploration

Anatoli E. Unitsky <sup>a,b</sup> , Sergei A. Pronkevich <sup>b,c</sup> , Sergei V. Artyushevsky <sup>b,d</sup>  , Vitali V. Looksha <sup>b</sup> 

<sup>a</sup> Astroengineering Technologies LLC, Minsk, Belarus

<sup>b</sup> Unitsky String Technologies Inc., Minsk, Belarus

<sup>c</sup> Belarusian State University, Minsk, Belarus

<sup>d</sup> Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

✉ s.artyshevskiy@unitsky.com

### Article history

Received: July 19, 2021

Revised: November 17, 2021

Accepted: November 25, 2021

### Keywords:

ecology, transport, biosphere, space exploration, non-rocket space industrialization, general planetary vehicle, industrial space necklace “Orbit”, EcoCosmoHouse

**Abstract.** The paper presents an alternative to rockets – general planetary vehicle (GPV) and industrial space necklace “Orbit” (ISN “Orbit”), which are a single complex necessary for the non-rocket near space exploration. The authors analyzed the conceptual design of the GPV and ISN “Orbit”, described their main characteristics, compared the impact of the GPV and launch vehicles on the Earth’s ecology. The principle of the GPV movement is based on centrifugal forces arising from the GPV acceleration in the plane of the equator. This is the main difference from rocket engines, which principle of operation is set up on the use of jet motion. The differentiation in the operation principles of the GPV and launch vehicles leads to serious variety in the energy required to lift the GPV to the near-Earth orbit and, accordingly, the variety in cost per payload ton. The concept of the ISN “Orbit” is described. The complex should serve as a basis for the removal of harmful industry to the near-Earth orbit and become a launching pad for active expansion into space. The GPV and ISN “Orbit” are effective means for the complex and progressive solution of environmental problems on Earth and productive implementation of space direction.

### For citation

Unitsky AE, Pronkevich SA, Artyushevsky SV, Looksha VV. General planetary vehicle and industrial space necklace “Orbit” as an alternative to rocket near space exploration. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(4):364–372. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-4-364-372>

### Введение

Существующие исследования по выводу на орбиту ракет основаны на применении движения, создаваемого реактивной струей сжигаемого топлива. Данные процессы являются экономически неэффективными, так как подразумевают затраты на перемещение топлива с Земли на орбиту для дальнейшего использования. Стоимость подобных перевозок составляет до 30 млн USD за 1 т груза<sup>1</sup> [1]. К тому же отходы от сгорания реактивного топлива негативно влияют на атмосферу и биосферу планеты [2].

За всю историю ракетной космонавтики на орбиту выводилось не более 400–500 т грузов ежегодно [3]. При этом один пуск тяжелой раке-

ты-носителя выжигает до 1 млн т озона на 1 т груза [3]. Поскольку масса атмосферного озона составляет около 3 млрд т (0,000064 % от массы атмосферы планеты) [4], то озоновый слой Земли может быть уничтожен при выведении на орбиту в короткий промежуток времени всего лишь 3000 т грузов.

Выбросы от твердотопливных ракетных двигателей и большинства жидкостных ракетных двигателей содержат свободные радикалы, такие как NO, OH, Cl, а также HCl, инертный N<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub> [5]. Некоторые типы топлива также производят оксид алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и частицы сажи в выхлопных газах, причем пропорции каждого из них зависят от типа используемого топлива [5]. Запуск ракет вызывает как локальные изменения окружающей среды в результате взаимодействия следа выхлопных газов ракеты с атмосферой, так и образование и перенос наземного облака ветром,

<sup>1</sup> Roberts T.G. Space launch to low earth orbit: how much does it cost? URL: <https://aerospace.csis.org/data/space-launch-to-low-earth-orbit-how-much-does-it-cost> (accessed: 01.02.2021).

а также глобальные эффекты, возникающие в результате дальнего распределения выбросов выхлопных газов в средних и верхних слоях атмосферы [6]. В итоге увеличение количества запусков может привести к истощению озонового слоя, что станет глобальной проблемой, которая поставит под угрозу всю биосферу планеты [2; 5]

### 1. Комплексная геокосмическая транспортная система как инновационный способ освоения ближнего космоса

Инженером Анатолием Юницким предложено альтернативное ракетам-носителям решение – общепланетарное транспортное средство (ОТС) [7]. Оно вместо токсичного ракетного топлива использует энергетически «чистую» транспортную систему.

Компоновочно-экоориентированный геокосмический транспортный комплекс состоит из трех глобальных мегаконструкций, охватывающих планету в экваториальной плоскости:

- экваториальная эстакада;
- ОТС;
- космическое индустриальное ожерелье «Орбита» (КИО «Орбита»).

*Экваториальная эстакада* – пусковая и посадочная площадка для ОТС, размещенная вдоль линии экватора, представляет собой транспортно-инфраструктурный объект длиной 40 075 км, более 80 % которого проходит через океанические участки.

В ее состав включены:

- локальные наземные транспортные системы, обеспечивающие распределение пассажиров и грузов;
- продуктопроводы для рабочих жидкостей;
- энергоисточники;
- пересадочные узлы и логистические комплексы.

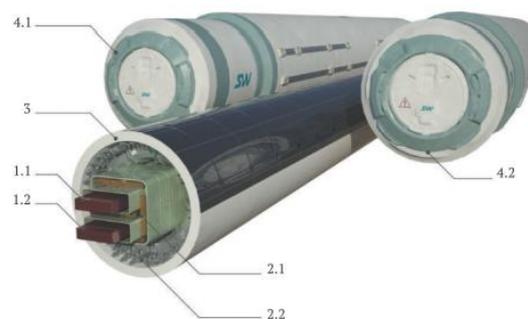
Экваториальный старт позволяет максимально продуктивно использовать энергию центробежной силы Земли, уменьшая энергозатраты и увеличивая энергоэффективность системы.

Экваториальной скорости вращения планеты, равной 463 м/с, недостаточно для преодоления силы тяжести, но она добавляется к скорости вращения маховиков во время движения вверх. Для выхода в ближний космос следует достичь орбитальной скорости, равной 7,89 км/с. Компенсация 1/17 части требуемой скорости приведет к существенной экономии энергоресурсов.

Также такое расположение во время старта смещает центр масс ОТС с центром масс планеты, тогда во время взлета они остаются постоянными, что исключит поперечные колебания ОТС относительно плоскости экватора и, соответственно, избавит от необходимости стабилизации системы в космосе и маневрирования перед стыковкой с космическим индустриальным ожерельем «Орбита».

*Общепланетарное транспортное средство* – экоориентированный геокосмический транспорт многоразового использования, позволяющий осваивать ближний космос без применения ракет. Представляет собой стабилизированный летательный аппарат самонесущей конструкции, имеющей форму тора. ОТС перед стартом располагается на экваториальной эстакаде, охватывающей Землю. Внутри тора находятся приводные элементы и системы ленточных маховиков для подъема ОТС. Вдоль тора распределена полезная нагрузка – пассажиры и грузы, помещенные в специальные модули (рис. 1).

В основу работы ОТС заложены принципы, опирающиеся на законы физики: маховики внутри корпуса разгоняются до скорости выше первой космической на уровне моря. ОТС за счет внутренней центробежной силы, увеличиваясь в диаметре (растягиваясь), взлетает вместе с грузом. Так как ОТС расположено в плоскости экватора и имеет форму тора, то его центр масс совпадает с центром масс Земли во всех возможных его положениях. Именно поэтому данный самонесущий летательный аппарат осуществляет подъем в космос только благодаря своим внутренним силам.



**Рис. 1.** Конструкция ОТС (вариант) [8]:

1.1 и 1.2 – ленточные маховики; 2.1 и 2.2 – системы привода; 3 – корпус; 4.1 и 4.2 – пассажирские/грузовые модули

**Figure 1.** GPV design (variant) [8]:

1.1 and 1.2 – belt flywheels; 2.1 and 2.2 – magnetic suspension systems and linear electric motor; 3 – body; 4.1 and 4.2 – containers with cargo and passengers (visualization)

Режим подъема и стыковки на орбите задается так, чтобы на любой рабочей высоте ОТС имело необходимую скорость, являлось стабилизированным и находилось в напряженном (растянутом) равновесии.

При доставке груза массой  $m_r$  на круговую орбиту  $r$  с расстояния  $R$  от центра Земли выполняется работа  $A$  (1) [8]:

$$A = \frac{\mu_3 m_r}{R} \left(1 - \frac{R}{2r}\right),$$

где  $\mu_3$  – гравитационный параметр Земли.

Для этого тело у поверхности Земли должно иметь характеристическую скорость  $V_x$ :

$$V_x^2 = \frac{2\mu_3}{R} \left(1 - \frac{R}{2r}\right) = V_2^2 \left(1 - \frac{R}{2r}\right),$$

где  $V_2^2$  – вторая космическая скорость.

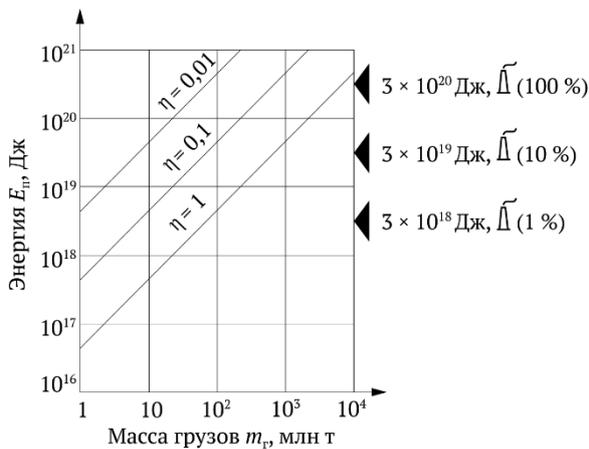


Рис. 2. Затраты энергии при выводе груза на орбиту,  $V_x = 10^4$  м/с

Полная энергия  $E_n$ , которую следует затратить на вывод тела в космос:

$$E_n = \frac{A_n}{\eta_э} = \frac{K_r}{\eta_э} = \frac{m_r V_x^2}{2\eta_э} = \frac{m_r \mu_3}{\eta R} \left(1 - \frac{R}{2r}\right),$$

где  $\eta_э$  – энергетический КПД ОТС с учетом всех предполетных и полетных потерь энергии;  $K_r$  – кинетическая энергия тела, имеющего скорость  $V_x$ .

Полная мощность  $N$ , развиваемая ОТС при выведении грузов на орбиту:

$$N_n = \frac{E_n}{t} = \frac{m_r \mu_3}{\eta R t} \left(1 - \frac{R}{2r}\right) = \frac{m_r V_2^2}{\eta t} \left(1 - \frac{R}{2r}\right),$$

где  $t$  – время работы ОТС (время подведения энергии к грузу).

На рис. 2 и 3 показаны затраты энергии и мощность ОТС при выведении на орбиту груза [8].

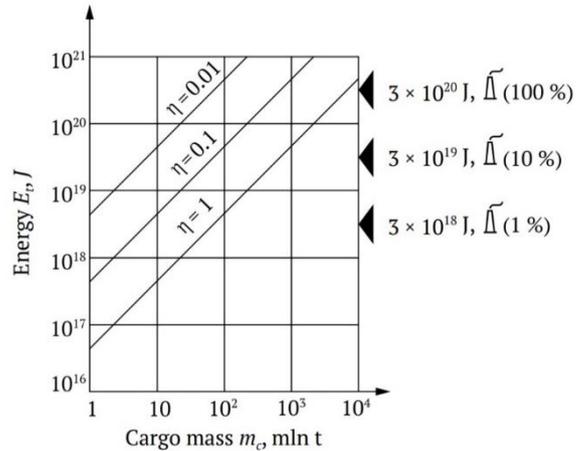


Figure 2. Energy consumption required to take cargo to the orbit,  $V_x = 10^4$  m/s

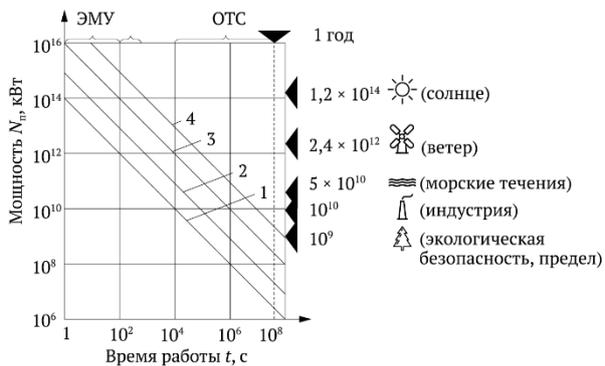


Рис. 3. Мощность, развиваемая ОТС при выводе на орбиту груза при  $V_x = 10^4$  м/с,  $\eta = 0,5$  и  $m_r$  равной: 1 – 1 млн т; 2 – 10 млн т; 3 – 100 млн т; 4 – 1 млрд т

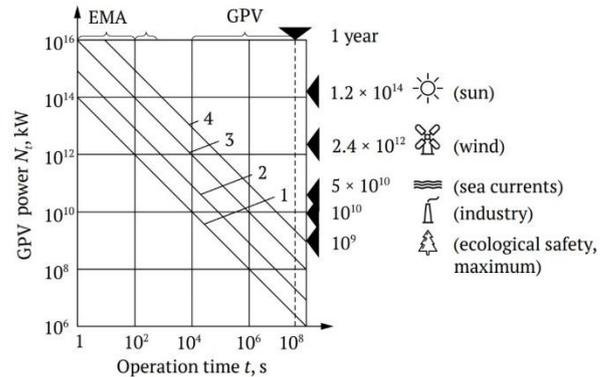
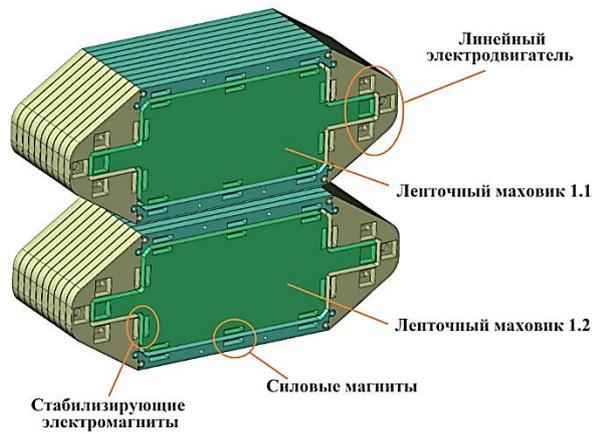
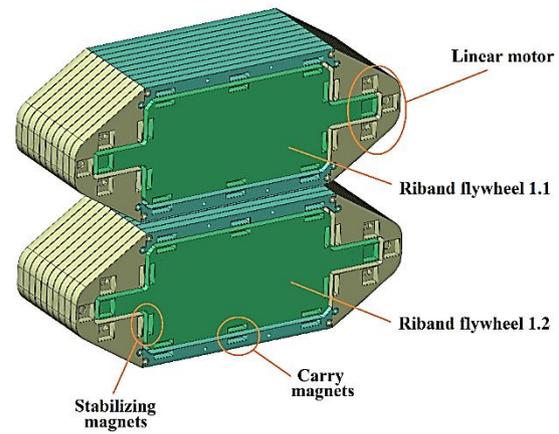


Figure 3. GPV generated power during taking cargo to the orbit at  $V_x = 10^4$  m/s,  $\eta = 0.5$  and  $m_c$  equals: 1 – 1 mln t; 2 – 10 mln t; 3 – 100 mln t; 4 – 1 bln t



**Рис. 4.** Вариант конструкции подвеса ленточных маховиков ОТС



**Figure 4.** Variant of the GPV flywheel suspension design

Необходимо учитывать, что при подъеме ОТС должно расширяться (увеличиваться в диаметре, растягиваясь), поэтому согласно формуле длины окружности  $l = 2\pi R$  возрастает не только длина транспорта, но и высота его нахождения над поверхностью планеты. На экваториальной эстакаде вдоль поверхности Земли длина ОТС, как уже упоминалось, равна 40 075 км. На высоте 500 км длина ОТС достигнет 43 216 км. Общее удлинение составляет 7,8 %. Данное увеличение размеров реализуется конструктивно за счет телескопических и гофрированных элементов, однако при выходе на орбиту, безусловно, приведет к незначительным дополнительным затратам энергии – менее 0,1 % от общих потерь энергии.

ОТС имеет уникальную конструкцию гибридного магнитного подвеса маховиков (рис. 4). В конструкцию входит система силовых постоянных магнитов, система стабилизирующих электромагнитов и линейный электродвигатель, обеспечивающий разгон маховиков, а также отбор мощности в процессе взлета ОТС.

Определена результирующая сила, действующая на ротор со стороны магнитной системы, при условии отсутствия внешних воздействий, за исключением гравитации, она равна 30 Н и направлена от центра масс земли.

Удельная грузоподъемность системы – 12 330 Н/м, или 1 257 кгс/м. При удельной массе маховиков и оболочки, равной 250, 225 и 200 кг/м соответственно, максимальная масса полезного груза составила 582 кг/м. Фактическая грузоподъемность – 500 кг/м.

Рассмотрим работу, выполненную ОТС в качестве грузового транспорта при подъеме груза с поверхности Земли на высоту 500 км.

Для подъема на заданную высоту два маховика ОТС суммарной массой 20 млн т (500 кг/м), получают кинетическую энергию порядка  $1,25 \times 10^{18}$  Дж (примерно  $3,5 \times 10^{11}$  кВт·ч). С учетом потерь, возникших из-за КПД линейных электродвигателей (95 %) и затрат энергии на подъем и выход на орбиту, стартовые энергозапасы должны быть больше на 15–20 %, то есть примерно  $1,5 \times 10^{18}$  Дж ( $4,2 \times 10^{11}$  кВт·ч). Это потребует внешней мощности от энергосистем планеты, подключенных к транспортному комплексу, – 100 млн кВт (ориентировочно 2,5 кВт на погонный метр системы). Как следствие, время стартовой зарядки такого экоориентированного космического транспорта – разгон ленточных маховиков до необходимой космической скорости (почти 10 км/с) – составит около 420 ч. При увеличении мощности запитки до 1 млрд кВт, время выхода ОТС на стартовый режим равно 42 ч. При этом ОТС удерживается на эстакаде с помощью специальных фиксирующих устройств – замков. После того как ленточные маховики наберут требуемую скорость, замки раскроются и транспорт вместе с грузом поднимется вверх симметрично вокруг планеты.

Стоимость первого запуска ОТС составит  $420\,000\,000\,000 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \times 0,05 \text{ USD} = 21\,000\,000\,000 \text{ USD}$  при себестоимости электроэнергии 0,05 USD/(кВт·ч).

При массе полезной нагрузки 10 млн т данный показатель будет соответствовать 2 100 USD/т, что примерно в тысячу раз меньше стоимости современных запусков и сопоставимо со стоимостью авиaperевозок между странами. Вместе с тем затраты указанной энергии на полезную транспорт-

ную работу во время выхода в космос и обратной посадки достигнут порядка 10 % (остальная энергия будет рекуперироваться между корпусом и маховиками ОТС и останется внутри системы), поэтому стоимость энергии на выведение груза на орбиту – около 200 USD/т.

Пятипроцентные потери в системе при движении ротора приводят к нагреву самого ротора и несущих магнитов на нем от действия вихревых токов, что отдает предпочтение Al-Ni-Co-Fe магнитам с высокой температурной стабильностью – до 550 °С. На рис. 5 приведена диаграмма вихревых токов, наведенных в статоре ОТС движущимися магнитами ротора. Функция магнитной индукции принята соответствующей пульсирующему магнитному полю с постоянным по ширине зазором и зависящим от одной координаты значением  $A_{z,m}(r)$ , то есть:

$$d_z = A_{z,m}(r) \sin \omega t.$$

Эта функция принята как мера упрощения расчета вихревого тока.

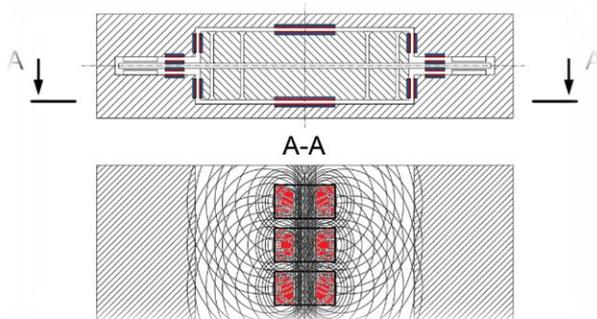


Рис. 5. Вихревые токи в статоре ОТС  
Figure 5. Eddy currents in the GPV stator

Расчеты вихревых токов проведены на базе методики, представленной и использованной в [9; 10]. Вихревые токи рассмотрены в плоскости листов сердечника статора и считаются возбужденными магнитным полем с заданной функцией магнитной индукции.

Тепловой нагрев статора обусловлен потерями энергии согласно закону Джоуля – Ленца. Потери энергии можно рассчитать по формуле

$$P_{\text{вихр}} = \frac{1,64d^2 f^2 B^2}{L\rho_v}.$$

Энергия потерь перейдет в тепловую. Выделившаяся мощность, равная  $7,5 \times 10^{16}$  Дж, отводится системой охлаждения.

## 2. Преимущества общепланетарного транспортного средства

Расчетная стоимость программы ОТС свыше 2 трлн USD [8], что превышает суммарный бюджет NASA за несколько десятилетий<sup>2</sup> [11]. Однако ее создание имеет сильные преимущества [12]:

- экологически чистая транспортировка грузов на орбиту и обратно;
- оптимизация средств связи (за счет снижения количества спутников, тем самым уменьшая загроуженность околоземной орбиты);
- сбор и переработка космического и земного мусора;
- противометеороидная защита Земли и добыча ресурсов из космических тел (астероидов, метеороидов и т. д.) без их повреждений в плотных слоях атмосферы;
- перенос экологически вредного и организация чистого промышленного производства без негативного влияния на биосферу (при обеспечении безопасной для озонового слоя утилизации отходов производств);
- возможность увеличения содержания озона в верхних слоях атмосферы в процессе движения ОТС, тем самым способствуя восстановлению озонового слоя;
- максимально эффективное использование солнечной энергии;
- космический туризм;
- снижение стоимости организации и проведения космических миссий;
- производство высокотехнологичных материалов.

*Космическое индустриальное ожерелье «Орбита»* – это производственно-жилой комплекс (рис. 6), опоясывающий планету вокруг экватора на заданной высоте [8]. Основная цель постройки КИО – создание на орбите Земли постоянной станции, состоящей из производственных и жилых модулей. Каждый биосферный жилой модуль – ЭкоКосмоДом (ЭКД) – обеспечит проживание нескольких сотен человек в природно-климатических условиях, моделирующих земные субтропики (для сравнения – сейчас на МКС работают максимум семь астронавтов) [13]. Производственные и жилые модули соединены транспортными, энергетическими и информационными коммуникациями.

<sup>2</sup> NASA suspends SpaceX's \$2.9 billion moon lander contract after rivals protest. URL: <https://www.theverge.com/2021/4/30/22412771/nasa-spacex-hls-moon-lander-blue-origin-protest> (accessed: 05.03.2021).



**Рис. 6.** Вид космического индустриального ожерелья «Орбита» с находящимися на нем ЭкоКосмоДомами (визуализация) [9]  
**Figure 6.** Design of the Space Industrial Necklace “Orbit” with the EcoCosmoHouses (visualization) [9]

КИО «Орбита» позволит размещать на орбите планеты требуемое для работы количество людей и грузов.

Самое важное, КИО «Орбита» послужит площадкой для выноса вредного производства с поверхности планеты. Использование Солнца в качестве источника энергии позволит уйти от зависимости от ископаемых видов топлива и исключит загрязнение атмосферы отходами промышленности.

### Заключение

Предварительная аналитика показывает возможность реализации проекта по безракетной индустриализации космоса путем создания ОТС как альтернативного и экологически чистого способа транспортировки грузов на орбиту. Приведенная в статье оценка затрат на строительство и эксплуатацию ОТС многократно превосходит реализованные проекты по освоению космоса. В дополнение стоимость вывода 1 т полезной нагрузки на околоземную орбиту более чем в тысячу раз ниже стоимости вывода с использованием ракет-носителей.

Строительство и использование ОТС и КИО «Орбита» может решить экологические проблемы, вопросы выживания человечества, послужит

толчком для дальнейшего активного освоения космического пространства, сделает космос доступным.

### Список литературы

1. Jones H.W. The recent large reduction in space launch cost // 48th International Conference on Environmental Systems, 8–12 July 2018, Albuquerque, New Mexico. New Mexico, 2018.
2. Dallas J.A., Raval S., Alvarez Gaitan J.P., Saydam S., Dempster A.G. The environmental impact of emissions from space launches: a comprehensive review // Journal of Cleaner Production. 2020. No. 255. 120209. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120209>
3. Юницкий А.Э. Программа «ЭкоМир»: безракетная индустриализация космоса. Минск, 2020. 57 с. URL: [http://ecospace.org/images/Program\\_EcoSpace\\_RU.pdf](http://ecospace.org/images/Program_EcoSpace_RU.pdf) (дата обращения: 01.12.2020).
4. Варгин П.Н., Груздев А.Н. Что происходит с озоновым слоем в настоящее время // Вестник Российской академии наук. 2013. Т. 83. № 4. С. 354–358. <https://doi.org/10.7868/S0869587313040269>
5. Ross M.N., Danilin M.Y., Weisenstein D.K., Ko M.K.W. Ozone depletion caused by NO and H<sub>2</sub>O emissions from hydrazine-fueled rockets // Journal of Geophysical Research. 2004. Vol. 109. D21305. <https://doi.org/10.1029/2003JD004370>

6. DeLuca L.T., Galfetti L., Maggi F., Colombo G., Merotto L., Boiocchi M., Paravan C., Reina A., Tadini P., Fanton L. Characterization of HTPB-based solid fuel formulations: performance, mechanical properties, and pollution // *Acta Astronautica*. December 2013. Vol. 92. No. 2. Pp. 150–162. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.05.002>

7. Юницкий А.Э. Исторические предпосылки программы SpaceWay как единственного пути устойчивого развития цивилизации технократического типа // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: сборник материалов II Международной научно-технической конференции. Марьина Горка, 2019. С. 23–29.

8. Юницкий А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе. Силакрогс: ПНБ принт, 2019. 576 с.

9. Данько В.Г., Милых В.И., Станкевич А.И. Вихревые токи в низкотемпературной зоне криостата в криодвигателе постоянного тока // *Электричество*. 1982. № 11. С. 14–19.

10. Милых В.И. Расчет вихревых токов в тонкой оболочке, расположенной в двигателе постоянного тока с криогенным охлаждением // *Электротехника*. 1985. № 4. С. 19–23.

11. Gurtuna O. *Fundamentals of space business and economics*. New York: Springer, 2013. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6696-3>

12. Юницкий А.Э. Программа SpaceWay – единственно возможный сценарий спасения земной технократической цивилизации от угасания и гибели // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: сборник материалов II Международной научно-технической конференции. Марьина Горка, 2019. С. 31–39.

13. Meixell M., Norbis M. A review of the transportation mode choice and carrier selection literature // *International Journal of Logistics Management*. 2008. Vol. 19. No. 2. Pp. 183–211. <https://doi.org/10.1108/09574090810895951>

## References

1. Jones HW. The recent large reduction in space launch cost. *48th International Conference on Environmental Systems, 8–12 July 2018, Albuquerque, New Mexico*. New Mexico; 2018.

2. Dallas JA, Raval S, Alvarez Gaitan JP, Saydam S, Dempster AG. The environmental impact

of emissions from space launches: a comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*. 2020;255:120209. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120209>

3. Unitsky A. *Ecospace program: non-rocket space industrialization*. Minsk; 2020. (In Russ.) Available from: [http://ecospace.org/images/Program\\_EcoSpace\\_RU.pdf](http://ecospace.org/images/Program_EcoSpace_RU.pdf) (accessed: 01.12.2020).

4. Vargin PN, Gruzdev AN. What is happening to ozone nowadays. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2013;83(4):354–358. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0869587313040269>

5. Ross MN, Danilin MY, Weisenstein DK, Ko MKW. Ozone depletion caused by NO and H<sub>2</sub>O emissions from hydrazine-fueled rockets. *Journal of Geophysical Research*. 2004;109:D21305. <https://doi.org/10.1029/2003JD004370>

6. DeLuca LT, Galfetti L, Maggi F, Colombo G, Merotto L, Boiocchi M, Paravan C, Reina A, Tadini P, Fanton L. Characterization of HTPB-based solid fuel formulations: performance, mechanical properties, and pollution. *Acta Astronautica*. 2013;92(2):150–162. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.05.002>

7. Unitsky A. Historical background of the space-way program as the only way to sustainable development of the technocratic civilization. *Non-Rocket Space Industrialization: Problems, Ideas, Projects: Materials of the II International Scientific and Technical Conference*. Marina Gorka; 2019. p. 23–29.

8. Unitsky A. *String transport systems: on earth and in space*. Silkagros: PNB Print; 2019.

9. Danko VG, Milykh VI, Stankevich AI. Eddy currents in the low-temperature zone of the cryostat in a DC cryomotor. *Elektrichestvo*. 1982;(11):14–19. (In Russ.)

10. Milykh VI. Calculation of eddy currents in a thin shell located in a DC motor with cryogenic cooling. *Elektrotehnika*. 1985;(4):19–23. (In Russ.)

11. Gurtuna O. *Fundamentals of space business and economics*. New York: Springer; 2013. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6696-3>

12. Unitsky A. The SpaceWay program is the only possible scenario for saving the terrestrial technocratic civilization from extinction and destruction. *Non-Rocket Space Industrialization: Problems, Ideas, Projects: Materials of the II International Scientific and Technical Conference*. Marina Gorka; 2019. p. 31–39. (In Russ.)

13. Meixell M, Norbis MA. Review of the transportation mode choice and carrier selection literature. *International Journal of Logistics Management*. 2008;19(2):183–211. <https://doi.org/10.1108/09574090810895951>

## Сведения об авторах

Юницкий Анатолий Эдуардович, кандидат философских наук, генеральный конструктор, Общество с ограниченной ответственностью «Астроинженерные технологии»; генеральный конструктор, Закрытое акционерное общество «Струнные технологии», Республика Беларусь, 220013, Минск, ул. Железнодорожная, д. 33. ORCID: 0000-0003-1574-35396, eLIBRARY AuthorID: 534122. E-mail: a@unitsky.com

Сергей Александрович Пронкевич, кандидат физико-математических наук, начальник конструкторского бюро «Инженерные расчеты», Закрытое акционерное общество «Струнные технологии», Республика Беларусь, 220013, Минск,

ул. Железнодорожная, д. 33; доцент кафедры био- и наномеханики, Белорусский государственный университет, Республика Беларусь, 220030, Минск, пр-кт Независимости, д. 4. ORCID: 0000-0001-9200-4110. E-mail: s.pronkevich@unitsky.com

*Артюшевский Сергей Владимирович*, заместитель генерального конструктора по науке, Закрытое акционерное общество «Струнные технологии», Республика Беларусь, 220013, Минск, ул. Железнодорожная, д. 33; магистр, Белорусский государственный университет транспорта, Республика Беларусь, 246653, Гомель, ул. Кирова, д. 34. ORCID: 0000-0003-0838-9228, eLIBRARY AuthorID: 1113279. E-mail: s.artushevskiy@unitsky.com

*Лукиша Виталий Леонидович*, ведущий инженер-электроник, Закрытое акционерное общество «Струнные технологии», Республика Беларусь, 220013, Минск, ул. Железнодорожная, д. 33. ORCID: 0000-0003-4553-0016. E-mail: v.luksha@unitsky.com

#### **About the authors**

*Anatoli E. Unitsky*, Ph.D, general design engineer, Astroengineering Technologies LLC; general design engineer, Unitsky String Technologies, Inc., 33 Zheleznodorozhnaya St, Minsk, 220089, Republic of Belarus. ORCID: 0000-0003-1574-3539. E-mail: a@unitsky.com

*Sergei A. Pronkevich*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Engineering Calculations Design Bureau, Unitsky String Technologies, Inc., 33 Zheleznodorozhnaya St, Minsk, 220089, Republic of Belarus; Associate Professor of Bio- and Nanomechanics Department, Belarusian State University, 4 Prospekt Nezavisimosti, Minsk, 220030, Republic of Belarus. ORCID: 0000-0001-9200-4110. E-mail: s.pronkevich@unitsky.com

*Sergey V. Artyushevsky*, deputy general designer for science, Unitsky String Technologies, Inc., 33 Zheleznodorozhnaya St, Minsk, 220089, Republic of Belarus; master's student, Belarusian State University of Transport, 4 Prospekt Nezavisimosti, Minsk, 220030, Republic of Belarus. ORCID: 0000-0003-0838-9228. E-mail: s.artushevskiy@unitsky.com

*Vitali L. Looksha*, leading electronics engineer, Unitsky String Technologies, Inc., 33 Zheleznodorozhnaya St, Minsk, 220089, Republic of Belarus. ORCID: 0000-0003-4553-0016. E-mail: v.luksha@unitsky.com