



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

**2020 Том 21 № 3**

**DOI: 10.22363/2312-8143-2020-21-3**

**<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, директор департамента механики и мехатроники Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

**Заместитель главного редактора**

**Резник Сергей Васильевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Ракетно-космические композитные конструкции», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

**Ответственный секретарь**

**Ткаченко Ирина Михайловна** – кандидат технических наук, доцент департамента механики и мехатроники Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

**Члены редакционной коллегии**

**Алифанов Олег Михайлович** – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, заведующий кафедрой космических систем и ракетостроения, Московский авиационный институт, Москва, Российская Федерация

**Галишишникова Вера Владимировна** – доктор технических наук, профессор, директор департамента строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

**Дивеев Асхат Ибрагимович** – доктор технических наук, профессор, заведующий сектором проблем кибернетики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление», Российская академия наук, Москва, Российская Федерация

**Захаров Валерий Николаевич** – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, директор Института проблем комплексного освоения недр, Российская академия наук, Москва, Российская Федерация

**Калугин Владимир Тимофеевич** – доктор технических наук, профессор, руководитель Научно-учебного комплекса специального машиностроения, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

**Коноплев Владимир Николаевич** – доктор технических наук, профессор департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

**Корнилова Анна Владимировна** – доктор технических наук, профессор департамента строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

**Малышев Вениамин Васильевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой системного анализа, Московский авиационный институт, Москва, Российская Федерация

**Омельченко Ирина Николаевна** – доктор технических наук, доктор экономических наук, профессор, декан факультета инженерного бизнеса и менеджмента, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

**Попов Гарри Алексеевич** – доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, директор Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики, Московский авиационный институт, Москва, Российская Федерация

**Рыльникова Марина Владимировна** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем комплексного освоения недр, Российская академия наук, Москва, Российская Федерация

**Фомин Валерий Михайлович** – доктор технических наук, профессор кафедры автомобильных и тракторных двигателей, Московский государственный машиностроительный университет, Москва, Российская Федерация

**Агравал Бридж** – профессор Навал Постградуейт Скул, Монтерей, Калифорния, Соединенные Штаты Америки

**Варатараджу Ренугант** – профессор Университета Путра Малайзия, Сери Кембанган, Малайзия

**Герман Анна** – профессор Университета Бейра Интериор, Ковилья, Португальская Республика

**Грациани Филиппо** – профессор Римского университета «Ла Сапиенца», Рим, Итальянская Республика

**Мисра Арун** – профессор Университета МакГилл, Монреаль, Канада

**Мортари Даниэль** – профессор Техасского университета А & М, Колледж-Стейшен, Техас, Соединенные Штаты Америки

**Спенсер Дэвид** – профессор Университета штата Пенсильвания, Университи-Парк, Пенсильвания, Соединенные Штаты Америки

**Фурфаро Роберто** – профессор Университета Аризоны, Тусон, Аризона, Соединенные Штаты Америки

**Хоулл Кэтлин** – профессор, Университет Пердью, Уэст-Лафайетт, Индиана, Соединенные Штаты Америки

**Ясика Тетсуо** – 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.

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.

Подписной индекс по каталогу агентства «Роспечать» – 18230.

**Цель и тематика**

В журнале публикуются результаты фундаментальных и прикладных научных исследований российских и зарубежных ученых в области авиационной и ракетно-космической техники, машиностроения и машиноведения, наук о земле. Цель журнала заключается в содействии развитию отечественных инженерных школ, продвижению и внедрению в практику современных перспективных исследований в указанных областях.

Научный журнал «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования» адресован научным работникам, инженерам, аспирантам, студентам старших курсов технических вузов. Включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК при Минобрнауки России. Выпуски журнала в полнотекстовом виде доступны в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) на платформе Научной электронной библиотеки (НЭБ) [elibrary.ru](http://elibrary.ru), а также на сайте журнала <http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

---

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 21.12.2020. Выход в свет 28.12.2020. Формат 60×84/8.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Times New Roman».  
Усл. печ. л. 7,44. Тираж 500 экз. Заказ № 612. 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) 952-04-41; e-mail: [publishing@rudn.ru](mailto:publishing@rudn.ru)



## RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCHES

2020 Volume 21 Number 3

DOI: 10.22363/2312-8143-2020-21-3

<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, Russian Federation

### Associate Editor-in-Chief

*Sergey V. Reznik* – Professor, Head of the Department "Rocket and Space Composite Structures", Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

### Assistant to the Editor-in-Chief

*Irina M. Tkachenko* – Associate Professor, Department of Mechanics and Mechatronics of the Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation

### Editorial Board

*Oleg M. Alifanov* – Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Space Systems and Missile Design, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russian Federation

*Vera V. Galishnikova* – Associate Professor, Director of the Department of Civil Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation

*Askhat I. Diveev* – Professor, Head of the Sector of Problems of Cybernetics of Federal Research Center "Informatics and Control", Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

*Valery N. Zaharov* – Professor, Director of the Institute for Problems of Integrated Development of the Subsurface, Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

*Vladimir T. Kalugin* – Professor, Dean of the Departments of Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

*Vladimir N. Konoplev* – Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation

*Anna V. Kornilova* – Associate Professor, Professor of the Department of Civil Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation

*Veniamin V. Malyshev* – Professor, Head of the Department of System Analysis, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russian Federation

*Irina N. Omelchenko* – Professor, Dean of the Department of Engineering Business and Management, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

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

*Marina V. Rylnikova* – Professor, Chief Researcher of the Institute for Problems of Integrated Development of the Subsurface, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

*Valeriy M. Fomin* – Professor, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

*Brij Agrawal* – Professor, Naval Postgraduate School, Monterey, California, United States of America

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

*Anna Guerman* – Professor, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portuguese Republic

*Filippo Graziani* – Professor, University Roma "La Sapienza", Rome, Italian Republic

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

*Daniele Mortari* – Professor, Texas A & M University, College Station, Texas, United States of America

*David Spencer* – Professor, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, United States of America

*Roberto Furfaro* – Professor, University of Arizona, Tucson, Arizona, United States of America

*Kathleen Howell* – Professor of the Purdue University, West Lafayette, Indiana, United States of America

*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)**

Published 4 times a year.

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 journal publishes results of fundamental and applied research of Russian and foreign scientists on specific scientific research themes. The editorial board of the journal invites the cooperation of experts working in the field of aerospace engineering, mechanical engineering and machine science, Earth science. The purpose of the journal is to contribute the development of Russian engineering schools, promotion and implementation of modern promising research projects in these areas.

The scientific journal "RUDN Journal of Engineering Researches" is addressed to researchers, engineers, graduate students, senior students of polytechnical universities. The journal has been included in the list of the leading review journals and editions of the Highest Certification Committee of 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>. The website contains full information about the journal, editorial policy and ethics, requirements for the preparation and publication of the articles, etc., as well as full-text issues of the journal since 2008 (Open Access).

---

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) 952-04-41; e-mail: [publishing@rudn.ru](mailto:publishing@rudn.ru)

## СОДЕРЖАНИЕ

### АВИАЦИОННАЯ И КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

- Городецкий М.А., Михайловский К.В.** Разработка методики проектирования теплонагруженных размеростабильных элементов конструкций из углепластика для космического аппарата дистанционного зондирования Земли ..... 159
- Барановски С.В., Михайловский К.В.** Влияние учета деформации крыла при определении аэродинамических нагрузок на начальных этапах проектирования ..... 166

### МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Асоян А.Р., Горшков А.С., Израелян А.Х.** Снижение износа юбок поршней двигателей внутреннего сгорания ..... 175
- Калягина Н.В., Карпухин И.И., Корнилова А.В., Сильверстов И.Н.** Работоспособность валковой тарельчатой мельницы для помола цемента ..... 181
- Юдин А.В., Стратиенко А.Н., Мадумаров М.М., Мирненко М.А.** Построение маршрутов в дополненной реальности с использованием ГИС-технологий ..... 189

### НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Георгиевский А.Ф., Бугина В.М.** Современное состояние и перспективы развития фосфатно-сырьевой базы России ..... 197

### СТРОИТЕЛЬСТВО

- Gil-oulbé M., Markovich A.S., Ngandu P., Anosova S.V.** Geometric nonlinear analysis of thin elastic paraboloid of revolution shaped shells with radial waves (Геометрически нелинейный расчет тонких упругих оболочек в форме параболоида вращения с радиальными волнами) ..... 208

## CONTENTS

### AEROSPACE ENGINEERING

- Gorodetskii M.A., Mikhaylovskiy K.V.** Development of a design methodology for heat-loaded dimensionally stable elements of carbon plastic construction for a remote sensing of the Earth space equipment ..... 159
- Baranovski S.V., Mikhaylovskiy K.V.** Assessment of wing deformation influence on airload determination at the initial design stages ..... 166

### MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

- Asoyan A.R., Gorshkov A.S., Israelyan A.H.** Less wear on the piston skirts of internal combustion engines ..... 175
- Kalyagina N.V., Karpukhin I.I., Kornilova A.V., Silverstov I.N.** Capacity of roller mill for cement grinding ..... 181
- Yudin A.V., Stratienko A.N., Madumarov M.M., Myrnenko M.A.** Construction of routes in augmented reality using GIS technologies ..... 189

### EARTH SCIENCE

- Georgievskiy A.F., Bugina V.M.** Actual situation and prospects for the development of the phosphate-raw material base of Russia ..... 197

### CIVIL ENGINEERING (CONSTRUCTION)

- Gil-oulbé M., Markovich A.S., Ngandu P., Anosova S.V.** Geometric nonlinear analysis of thin elastic paraboloid of revolution shaped shells with radial waves ..... 208



## АВИАЦИОННАЯ И КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА AEROSPACE ENGINEERING

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-3-159-165

УДК 629.783

Научная статья

### Разработка методики проектирования теплонагруженных размеростабильных элементов конструкций из углепластика для космического аппарата дистанционного зондирования Земли

М.А. Городецкий, К.В. Михайловский

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),  
Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

#### История статьи:

Потушила в редакцию: 13 апреля 2020 г.

Доработана: 26 апреля 2020 г.

Принята к публикации: 27 июля 2020 г.

#### Ключевые слова:

космические аппараты дистанционного зондирования Земли, солнечно-синхронная орбита, полимерные композиционные материалы, напряженно-деформированное состояние

*Аннотация.* Одной из наиболее важных задач Федеральной космической программы России на период до 2025 года является создание космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Неотъемлемой частью проектирования космических аппаратов такого класса считается определение параметров орбит, которые наиболее эффективны с позиций информативности, энергообеспечения и срока активного существования. В орбитальном полете температурное состояние космических аппаратов сложным образом меняется во времени и пространстве. Неоднородное температурное поле элементов конструкции космических аппаратов может стать причиной искажения формы, отрицательно влияющего на выполнение целевых задач. Предложена методика комплексного анализа и определения параметров конструкции платформы из полимерного композиционного материала, входящей в состав космического аппарата дистанционного зондирования Земли. Рассмотрены условия теплового нагружения для полета по солнечно-синхронной орбите и выполнено математическое моделирование условий функционирования, обеспечивающих эффективную эксплуатацию такого рода космических аппаратов. Представлены результаты моделирования теплового режима вариантов конструкций платформы из полимерного композиционного материала. Методика будет полезна при определении комплекса орбитальных характеристик космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на этапе технических предложений.

#### Введение

В современной ракетно-космической технике прочностные и массово-габаритные требования, предъявляемые к конструкциям, непрерыв-

но повышаются, а условия эксплуатации изделия становятся все более экстремальными. Так, элементы конструкций спутников связи и дистанционного зондирования Земли подвергаются воздействиям знакопеременных температурных нагрузок, радиационному излучению.

Для обеспечения высокой весовой эффективности конструкций широко применяются трехслойные панели с обшивками из углепластика, представляющие собой систему, которая состоит из двух внешних сравнительно тонких слоев и среднего, более толстого слоя. Обшивки изготавлива-

*Городецкий Михаил Алексеевич*, аспирант кафедры СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ имени Н.Э. Баумана; eLIBRARY SPIN-код: 1535-1785; Scopus Author ID: 57207449782.

*Михайловский Константин Валерьевич*, доцент кафедры СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ имени Н.Э. Баумана; кандидат технических наук; eLIBRARY SPIN-код: 6481-7346; Scopus Author ID: 57204666941; Konst\_mi@mail.ru

© Городецкий М.А., Михайловский К.В., 2020

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

ют преимущественно из углепластика, который обладает относительно невысокой плотностью, высокими физико-механическими характеристиками, низкими температурными коэффициентами линейного расширения. Заполнитель изготавливают из материалов с малой плотностью (вспененного полимерного материала, легкого металла в форме сот, перемычек, гофрировки или другой конструкции). Обшивки испытывают продольные нагрузки (растяжение, сжатие, сдвиг) в своей плоскости и поперечные изгибающие моменты. Заполнитель воспринимает поперечные силы при изгибе и обеспечивает совместную работу и устойчивость несущих слоев. Трехслойные панели при малом весе обладают повышенной жесткостью на изгиб, что позволяет получить значительный выигрыш в весе для конструкций, воспринимающих сжимающие усилия. Опыт эксплуатации и отработки объектов с применением трехслойных пакетов показал высокую эффективность трехслойных конструкций, а порой – их незаменимость.

Одной из наиболее важных областей применения трехслойных конструкций является их использование для задач околоземных космических полетов на низких орбитах с целью дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Спутники ДЗЗ предназначены для изучения земной поверхности различных местностей и регионов, выявления залежей полезных ископаемых, аномальных явлений природы (пожаров, наводнений, землетрясений, извержений вулканов и т. д.). В настоящее время создание систем ДЗЗ входит в состав федеральной космической программы и является одним из приоритетных направлений для развития ракетно-космической промышленности в России. Спутниками связи и ДЗЗ занимаются такие компании, как Lockheed Martin Commercial Space

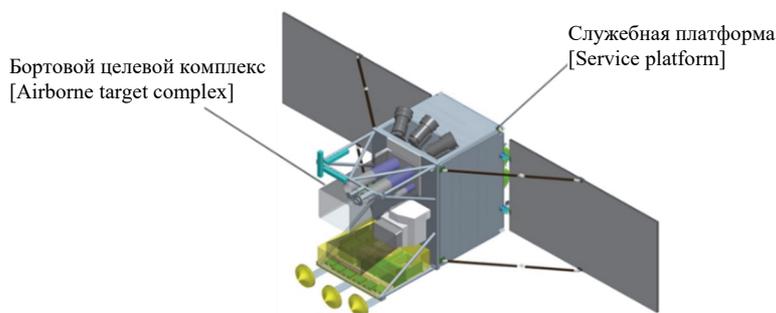
Systems, Orbital Sciences Corporation, Boeing Satellite Systems, Space Systems/Loral, EADS Astrium, Thales Alenia Space, АО «ИСС», АО «ВНИИЭМ» и ряд других.

Повышение экономичности и надежности космических аппаратов (КА) неразрывно связано с возможностью уменьшения массы конструкции при сохранении или даже повышении прочности. Решение проблем в этом направлении связывают с разработкой новых видов обшивок и заполнителей в трехслойных конструкциях. Актуальной задачей является создание метода расчета и оптимизации конструкции многослойной панели с учетом различных требований, обусловленных их эксплуатацией, особенностью изготовления, а также технологических ограничений. Работы в данной области ведутся специалистами США, Франции, Японии, КНР, России [1–13].

На основе вышесказанного целью настоящей работы является определение тепловых нагрузок и напряженно-деформированного состояния элементов космического аппарата ДЗЗ для выбора и обоснования материалов, позволяющих достичь рациональных весовых параметров.

### 1. Компоновка космического аппарата ДЗЗ

В одном из конструктивных вариантов исполнения КА имеет форму прямоугольного параллелепипеда, элементы которого соединены между собой и подсоединены к переходной ферме (рис. 1). Для удобства сборки и монтажа приборов аппарат разделен на два отсека: отсек полезной нагрузки (бортовой целевой комплекс) и отсек служебных систем (служебная платформа).



**Рис. 1.** Общий вид КА ДЗЗ  
[Figure 1. General view of the remote sensing spacecraft]

Основные требования к многоцелевой служебной платформе, обусловлены ее конструктивно-компоновочной схемой: минимальные габариты и масса, сохранение исходных габаритов при воздействии внешних и внутренних источников, минимальные конструктивные изменения при установке на нее целевой аппаратуры КА, минимальный объем наземной экспериментальной отработки, удобство эксплуатации.

Платформа КА представляет собой размеростабильную несущую конструкцию, не имеющую герметичных отсеков. Панели отсеков имеют вид трехслойной конструкции, состоящей из сотового заполнителя алюминиевого сплава, двух листов обшивки из углепластика, тепловых труб, предназначенных для выравнивания температурных полей, а также закладных элементов для крепления аппаратуры. Солнечные батареи состоят из двух панелей по четыре секции каждая.

## **2. Моделирование движения космического аппарата ДЗЗ по орбите**

Прежде всего, предъявляемые функциональные требования к КА ДЗЗ влияют на их динамические характеристики, то есть на рабочую орбиту. Была составлена математическая модель динамики движения КА ДЗЗ по орбите и условий его функционирования. Эта модель реализована в программной среде Matlab, по ее результатам проанализированы характеристики орбиты КА ДЗЗ [13]. Расчет математической модели определил параметры рабочей орбиты для КА ДЗЗ: высота орбиты  $h = 514$  км, наклонение орбиты  $i = 97,4^\circ$ , местное время прохождения восходящего узла  $t_\Omega = 6 h$ . Тип орбиты – околокруговая (с эксцентриситетом  $e = 0,00135$ ), солнечно-синхронная, кратная (период кратности – 14 суток).

## **3. Моделирование температурного поля и напряженно-деформированного состояния размеростабильных элементов конструкции космического аппарата**

Влияние космического пространства на КА складывается из суммы коротковолнового электромагнитного излучения (ЭМИ), состоящего как из длинноволнового ультрафиолетового (УФ), видимого и коротковолнового инфракрасного (ИК) спектров ЭМИ, так и из длинноволнового ИК ЭМИ (теплового излучения). Спектр солнечного

излучения состоит в основном из первых трех ЭМИ, а длинноволновое ИК относится как к собственному тепловому излучению Земли, так и к тепловым потокам излучения между элементами конструкций КА.

Под воздействием ЭМИ в силовых конструкциях КА возникают температурные деформации, которые влияют на размеры и форму основных элементов КА ДЗЗ, находящегося в условиях эксплуатации на орбите.

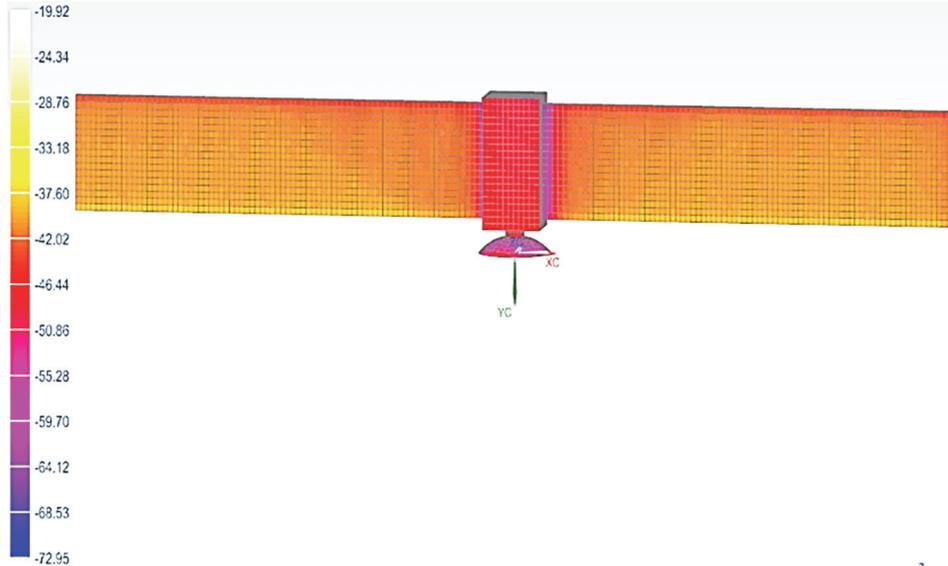
Для оценки изменения температурного поля и влияния его на напряженно-деформированное состояние размеростабильных элементов конструкции КА ДЗЗ заданы условия, соответствующие движению по определенной выше солнечно-синхронной орбите. Распределение температурного поля и напряженно-деформированное состояние в конструкции КА рассматривались в течение года полета по орбите, в связи с чем выбраны четыре наиболее показательные точки изменения светотеневой обстановки: зимнее и летнее солнцестояние, весеннее и осеннее равноденствие.

В качестве исследуемых элементов конструкции в работе рассмотрены платформа, солнечные батареи и рефлектор антенны. Геометрические модели разработаны для платформы в форме параллелепипеда размерами  $1600 \times 2000 \times 2000$  мм, панели солнечных батарей размерами  $8000 \times 1700$  мм; рефлектора антенны диаметром 1200 мм и высотой 100 мм. Необходимые для моделирования данные по теплофизическим характеристикам заимствовались из справочника [14], а по оптическим характеристикам из справочника [15]. Моделирование проводилось в программном комплексе NX. Строилась конечно-элементная модель КА ДЗЗ со средним диагональным размером конечного элемента не более 100 мм. Параметрическое моделирование выполнялось с помощью модуля NX/Space Systems Thermal в котором заданы параметры орбиты, ориентация КА в пространстве, положение Солнца относительно орбиты. Отдельные результаты по определению температурных полей и напряженно-деформированного состояния элементов конструкций приведены на рис. 2–4.

Из результатов параметрического моделирования определено, что распределение температурного поля в течение года меняется от  $-70$  до  $+88$  °С (рис. 2, 3), а перемещения в конструкции не превышают 18 мм (рис. 4), что укладывается в диапазон допустимых значений. Кроме того,

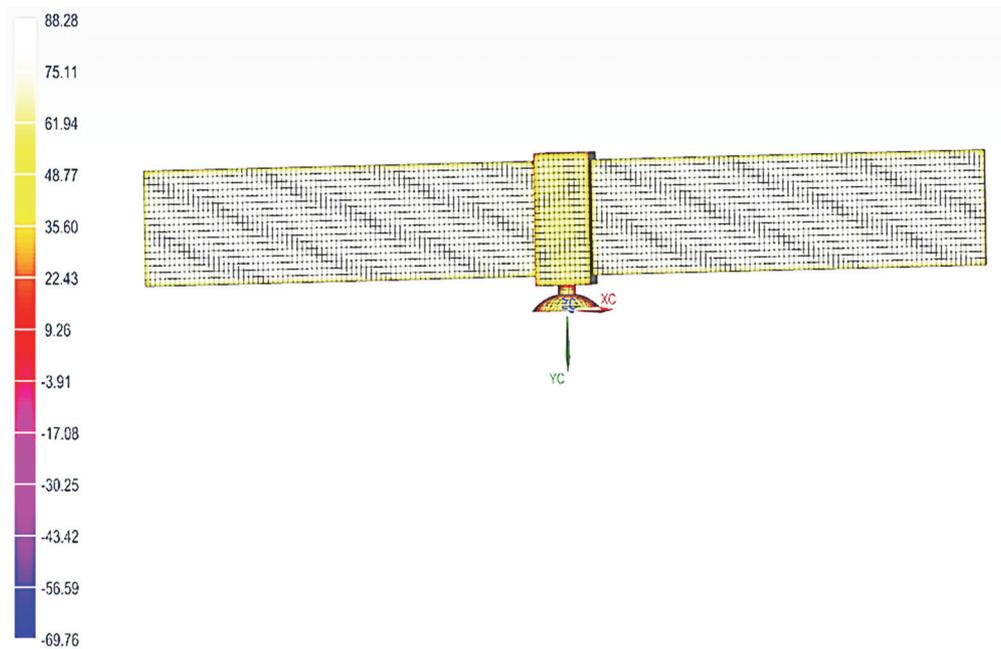
установлено, что для более детального анализа напряженно-деформированного состояния элементов конструкций КА ДЗЗ из полимерных композиционных материалов необходимо выполнять расчет всего аппарата из-за возможного затене-

ния конструктивными элементами и создания больших температурных градиентов. На основе полученных результатов оценивается напряженно-деформированное состояния элементов конструкций КА ДЗЗ.



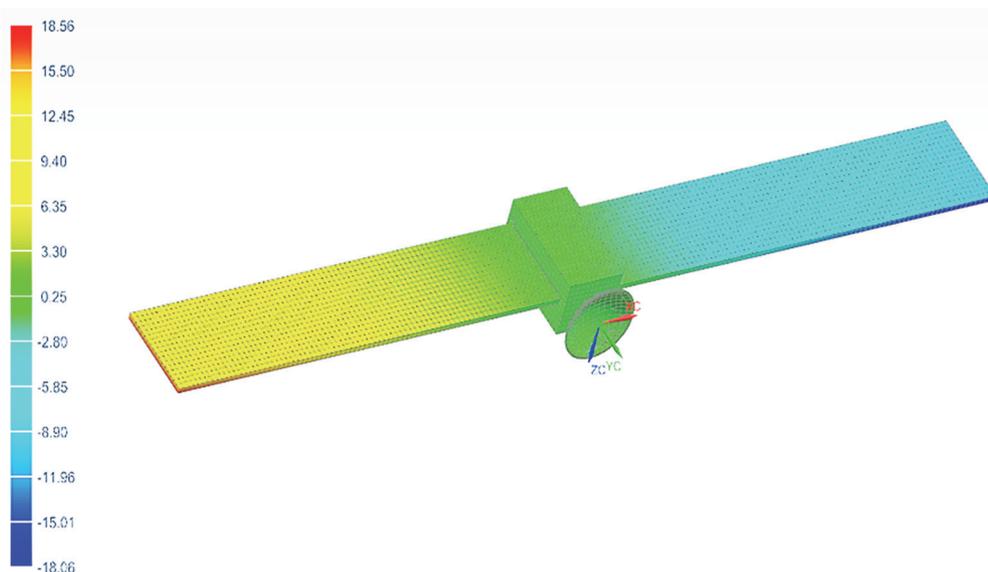
**Рис. 2.** Температурное поле в конструкции КА под влиянием нагрева потоками теплового излучения от Солнца в период зимнего солнцестояния и Земли (теньевая часть витка), °C

[Figure 2. The temperature field in the spacecraft structure under the influence of heating by thermal radiation fluxes from the Sun during the winter solstice and the Earth (shadow part of the orbit), °C]

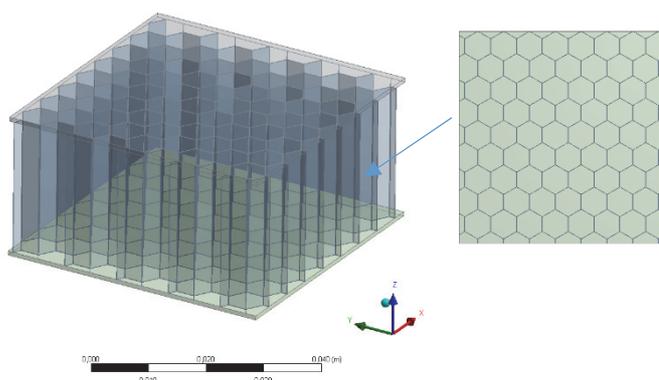


**Рис. 3.** Температурное поле в конструкции КА под влиянием нагрева потоками теплового излучения от Солнца в период весеннего равноденствия и Земли (освещенная часть витка) на освещенной стороне КА, °C

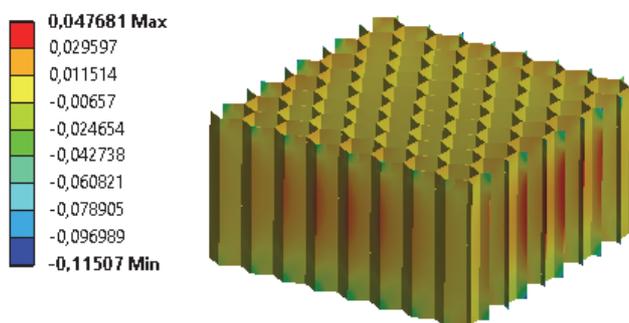
[Figure 3. The temperature field in the spacecraft structure under the influence of heating by thermal radiation flux from the Sun during the spring equinox and the Earth (the illuminated part of the orbit) on the lightened side of the spacecraft, °C]



**Рис. 4.** Общие перемещения в конструкции КА под влиянием нагрева потоками теплового излучения от Солнца в период зимнего солнцестояния и Земли (освещенная часть витка), мм  
**[Figure 4.** General displacements in the spacecraft structure under the influence of heat fluxes from the Sun during the winter solstice and the Earth (illuminated part of the orbit), mm]



**Рис. 5.** Геометрическая модель элемента размеростабильной платформы КА ДЗЗ с обшивками из углепластика  
**[Figure 5.** Geometric model of an element of the dimensionally stable remote sensing spacecraft platform with carbon-epoxy composite material plating]



**Рис. 6.** Деформации в перпендикулярном к обшивкам направлении в сотах под влиянием нагрева потоками теплового излучения от Солнца в период весеннего равноденствия и Земли (освещенная часть витка) на освещенной стороне КА  
**[Figure 6.** Deformations in the direction perpendicular to the sheathing in the cells under the influence of heat flux from the Sun during the spring equinox and the Earth (illuminated part of the orbit) on the illuminated side of the spacecraft]

На рис. 5 и 6 приведены отдельные результаты расчета напряженно-деформированного состояния в элементе размеростабильной платформы КА ДЗЗ с обшивками из углепластика на основе углеродной ленты и алюминиевым сотовым наполнителем.

## Заключение

Предложена методика определения температурного и напряженно-деформированного состояния элементов конструкций КА ДЗЗ для выбора рациональных конструктивно-компоновочных решений, которая позволяет учитывать:

- динамику полета КА по орбите; в частности приведен расчет для орбиты со следующими рабочими параметрами: высота орбиты  $h = 514$  км, наклонение орбиты  $i = 97,4^\circ$ , местное время прохождения восходящего узла  $m_\Omega = 6 h$ , тип орбиты – околокруговая (с эксцентриситетом  $e = 0,00135$ ), солнечно-синхронная, кратная (период кратности – 14 суток);

- тепловые потоки на КА ДЗЗ от Солнца, прямое излучение Земли и отраженное от Земли излучение Солнца;

- затенение и переотражение элементами конструкции КА ДЗЗ при моделировании теплообмена;

- напряженно-деформированное состояние конструктивных элементов КА ДЗЗ на уровне структуры материала (в обшивках и сотах трехслойных сотовых панелей).

Методика может представлять интерес на начальных этапах проектирования элементов конструкций КА ДЗЗ с применением полимерных композиционных материалов.

## Список литературы / References

1. Meseguer J, Pérez-Grande I, Sanz-Anrés A. *Spacecraft thermal control*. 1<sup>st</sup> ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited; 2012.
2. Schaub H, Junkins JL. *Analytical mechanics of space systems*. 2<sup>nd</sup> ed. Reston, VA; 2009.
3. Montenbruck O, Gill E. *Satellite orbits: models, methods, applications*. Berlin: Heidelberg Springer – Verlag; 2000.
4. Hastings D, Garrett H. *Spacecraft-Environment interactions*. Cambridge: Cambridge University Press; 2004.
5. Hengeveld DW, Mathison MM, Braun JE, Groll EA, Williams AD. Review of Modern Spacecraft Thermal Control Technologies. *HVAC&R Research*. 2010;16(2): 189–220.

6. Reznik SV, Prosuntsov PV, Mikhailovsky KV, Shafikova IR. Material science problems of building space antennas with a transformable reflector 100 m in diameter IOP. *Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016;153(1):10.

7. Sayapin SN, Shkapov PM. Kinematics of deployment of petal-type large space antenna reflectors with axisymmetric petal packaging. *J. of Machinery Manufacture and Reliability*. 2016;45(5):387–397.

8. Reznik SV, Prosuntsov PV, Azarov AV. Substantiation of the structural-layout scheme of the mirror-space-antenna reflector with a high shape stability and a low density per unit length. *J. Eng. Phys. Thermophy*. 2015;88(3):699–705.

9. Golovатов D, Mikhaylov M, Bosov A. Optimization of technological parameters of impregnation of load-bearing rod elements of reflector made of polymer composite materials by transfer molding method. *Indian J. of Science and Technology*. 2016;9(46):107492.

10. Prosuntsov PV, Reznik SV, Mikhailovsky KV, Novikov AD, Zaw Ye Aung. Study variants of hard CFRP reflector for intersatellite communication. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016;153(1):7.

11. Reznik SV, Novikov AD. Comparative analysis of the honeycomb and thin-shell space antenna reflectors MATEC Web of Conferences. *Thermophysical Basis of Energy Technologies*. 2017;92(01012):1–5. doi: 10.1051/mateconf/20179201012.

12. Escobar E, Diaz M, Zagal JC. Evolutionary design of a satellite thermal control system: real experiments for a CubeSat mission. *Applied Thermal Engineering*. 2016; 105:490–500.

13. Mikhaylovskiy KV, Gorodetskiy MA. Development of method for determining and correcting parameters of the working orbit of the earth remote sensing satellite. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2017;18(3): 361–372. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2017-18-3-361-372>

Михайловский К.В., Городецкий М.А. Разработка методики определения и коррекции параметров рабочей орбиты космического аппарата дистанционного зондирования Земли // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2017. Т. 18. № 3. С. 361–372.

14. Bolton W. *Engineering materials: pocket book*. Newnes, 2000.

Болтон У. Конструкционные материалы: металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты: карманный справочник. М.: Металлургия, 2007.

15. Latyev LN, Petrov VA, Chekhovskoy VY, Sheshtakov EN. *Izluhatelnye svojstva tverdyh materialov [Emitting Properties of Solid Materials]*. Moscow: Energiya Publ.; 1974. (In Russ.)

Латыев Л.Н., Петров В.Я., Чеховской Е.Н., Шештаков Е.Н. Излучательные свойства твердых материалов. М.: Энергия, 1974.

**Для цитирования**

Городецкий М.А., Михайловский К.В. Разработка методики проектирования теплонагруженных размеростабильных элементов конструкций из углепластика для космического аппарата дистанционного зондиро-

вания Земли // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 159–165. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-3-159-165>

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-3-159-165

Research article

**Development of a design methodology  
for heat-loaded dimensionally stable elements of carbon plastic construction  
for a remote sensing of the Earth space equipment**

**Mikhail A. Gorodetskii, Konstantin V. Michaylovskiy**

Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology),  
5 2-ya Baumanskaya, bldg 1, Moscow, 105005, Russian Federation

*Article history:*

Received: April 13, 2020

Revised: April 26, 2020

Accepted: July 27, 2020

*Keywords:*

Earth remote sensing spacecraft, solar-synchronous orbit, polymer composite materials, stress-strain state

*Abstract.* One of the most important tasks of the Federal Space Program of Russia for the period until 2025 is the creation of spacecraft for remote sensing of the Earth. An integral part of the design of this class spacecraft is the determination of the parameters of the orbits that are most effective from the standpoint of information content, energy supply and the duration of active existence. In orbital flight, the temperature state of spacecraft in a complex way varies in time and space. The inhomogeneous temperature field of the structural elements of spacecraft can cause shape distortion, which adversely affects the performance of targets. A technique for a comprehensive analysis and determination of the platform composite design parameters, which is part of the spacecraft for remote sensing of the Earth is proposed. The conditions of thermal loading for flight in a sun-synchronous orbit are considered and mathematical modeling of the operating conditions that ensure the effective operation of such spacecraft is performed. The results of modeling the thermal regime of options for composite platform designs are presented. The technique will be useful in determining the complex of orbital characteristics of the Earth remote sensing satellite at the stage of technical proposals.

**For citation**

Gorodetskii MA, Michaylovskiy KV. Development of a design methodology for heat-loaded dimensionally stable elements of carbon plastic construction for a remote sensing of the Earth space equipment. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(3):159–165. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-3-159-165>

*Mikhail A. Gorodetskii*, postgraduate of the Department SM-13 Rocket and Space Composite Structures of the Bauman MSTU; eLIBRARY SPIN-code: 1535-1785, Scopus Author ID 57207449782.

*Konstantin V. Michaylovskiy*, Associate Professor of the Department SM-13 Rocket and Space Composite Structures of the Bauman MSTU; Candidate of Science (Eng.); eLIBRARY SPIN-code: 6481-7346; Scopus Author ID: 57204666941; [Konst\\_mi@mail.ru](mailto:Konst_mi@mail.ru)



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-3-166-174

УДК 629.023:533.69.048

Научная статья

## Влияние учета деформации крыла при определении аэродинамических нагрузок на начальных этапах проектирования

С.В. Барановски, К.В. Михайловский

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),  
Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

### История статьи:

Потупила в редакцию: 14 апреля 2020 г.

Доработана: 26 апреля 2020 г.

Принята к публикации: 27 июля 2020 г.

### Ключевые слова:

авиалайнер, крыло, аэродинамические нагрузки, аэродинамическое давление, обтекание поверхности, конечные элементы

*Аннотация.* При проектировании самолетов большое внимание уделяется крылу как одному из наиболее ответственных элементов планера. Во время разработки необходимо иметь четкое представление о последовательности действий, степени влияния различных факторов и особенностей расчета на сроки получения и качество результата. Кроме того, само проектирование такого элемента конструкции является сложной комплексной мультидисциплинарной задачей, затрагивающей различные области науки, которая значительно усложняется с применением полимерных композиционных материалов (ПКМ). В рамках решения актуальной задачи по составлению методики проектирования крыла из ПКМ, применяемой на начальных этапах и учитывающей выбор внешнего облика, обоснование конструктивно-силовой схемы и отдельных силовых элементов, необходимо определить степень влияния деформации крыла на получаемые нагрузки, используемые при расчете и определении параметров изделия. В работе рассмотрено обтекание воздушным потоком крыла пассажирского авиалайнера и проанализированы величины давления при различных режимах полета. Проведено сравнение исходной теоретической поверхности крыла и деформированной при полете, а также определено различие в нагружении рассмотренных вариантов. Результаты будут учтены и использованы при составлении методики проектирования крыла из ПКМ на основе параметрического моделирования.

### Введение

Аэродинамика является одним из основных факторов, влияющих на характеристики самолета, включая топливную эффективность, акустические

эффекты, а также нагружения его элементов и агрегатов. На аэродинамические характеристики оказывают влияние такие факторы, как компоновка [1] с учетом двигателя [2] и механизации [3], облечение поверхности при полетах в облаках с различным фазовым составом [4; 5]. Наибольшее число исследований в области аэродинамики сосредоточено на изучении различных новых вариантов конструкций и геометрических форм [6] с последующим сравнением экспериментальных данных с результатами численного моделирования и их объединением в расчетах [7]. Однако также проводятся работы по изучению влияния геометрических

*Барановски Сергей Владиславович*, аспирант, ассистент кафедры СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ имени Н.Э. Баумана; eLIBRARY SPIN-код: 6154-8493; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9294-0929>.

*Михайловский Константин Валерьевич*, доцент кафедры СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ имени Н.Э. Баумана; кандидат технических наук; eLIBRARY SPIN-код: 6481-7346, Scopus Author ID: 57204666941, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3424-3775>. [konst\\_mi@mail.ru](mailto:konst_mi@mail.ru)

© Барановски С.В., Михайловский К.В., 2020

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

характеристик крыла на аэродинамику [8] при различных режимах полета [9], в том числе для адаптивных крыльев [10]. Учитывается многодисциплинарность задачи [11], решение и оптимальные результаты которой достигаются с помощью применения различных методов, таких как генетические алгоритмы [12], топологическая оптимизация [13], сопряженных градиентов [14]. Из вышеизложенного понятно, что проводимые работы затрагивают множество вопросов из области аэродинамики, которые трудно одновременно учесть при проектировании изделий, в том числе из композиционных материалов [15–17], поэтому наличие универсальной методики [18] позволит получить первичную конструкцию крыла с учетом основных факторов.

Цель настоящей работы заключается в анализе влияния учета деформации крыла на определяемые аэродинамические нагрузки на этапе проектных расчетов для обеспечения создания оптимальных конструктивно-силовых схем из полимерных композиционных материалов (ПКМ).

### 1. Исходные данные

Объектом исследования выбрано стреловидное крыло пассажирского авиалайнера [19] размахом 35 м со спрямленным участком и несимметричным аэродинамическим профилем (рис. 1). Рассматривалась изолированная поверхность.

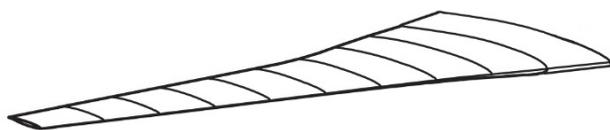


Рис. 1. Внешний вид модели крыла  
[Figure 1. View of wing model]

Расчет проводился для крейсерского режима полета на высоте 11 500 м со скоростью 242 м/с. Рассматривалось несколько углов атаки (0, +11, -7°), соответствующих различным режимам полета.

Вычисления проводились с помощью метода конечных объемов в программном комплексе ANSYS, в котором реализовано решение усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса (RANS) с применением модели турбулентности  $k-\epsilon$ . Воздух считался совершенным газом, параметры стандартной атмосферы взяты по ГОСТ 4401-81. При расчете обеспечивался критерий схождения  $10^{-4}$  (точность решения).

Модель исследования представляет собой параллелепипед. Расстояние от края расчетной области до объекта исследования составляло 5 длин хорд для ускорения расчетов [20]. Параметры набегающего потока, соответствующие режиму полета, задавались на фронтальную поверхность, истекающий поток – на тыльную поверхность (рис. 2). На крыле отсутствует скольжение, то есть скорость потока на поверхности равна нулю, на остальных поверхностях – свободное течение. Построена нерегулярная объемная тетраэдральная сетка с дискретизацией у поверхности крыла и пятью слоями призматических ячеек для учета граничных эффектов.

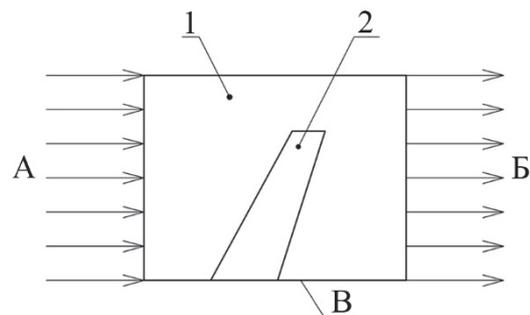


Рис. 2. Схема расчета:  
1 – воздушная среда; 2 – крыло; потоки: А – набегающий; Б – истекающий; В – условие симметрии  
[Figure 2. Design schedule:  
1 – air; 2 – wing; flow system: A – inlet; Б – outlet; B – symmetry condition]



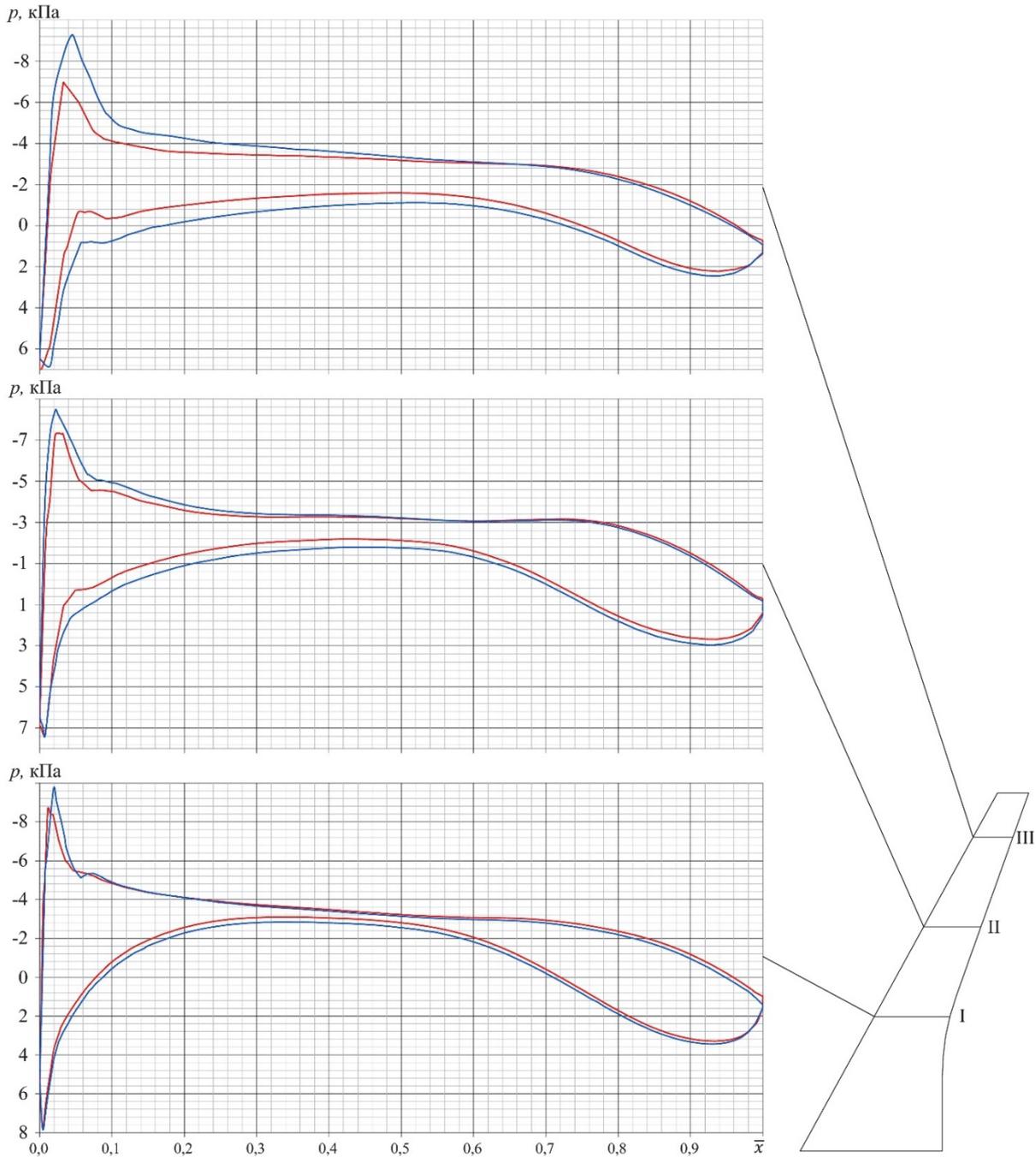
Рис. 3. Варианты крыльев:  
1 – угол атаки +11°; 2 – недеформированное;  
3 – угол атаки 0°; 4 – угол атаки -7°  
[Figure 3. Wing form:  
1 – angle of attack +11°; 2 – undeformed;  
3 – angle of attack 0°; 4 – angle of attack -7°]

Проведено моделирование обтекания крыла исходной недеформированной геометрии при трех углах атаки. Полученные значения давлений были использованы в качестве нагрузок при расчете напряженно-деформированного состояния, в результате моделирования которого также определены три формы деформации крыла (рис. 3). На основе полученных перемещений в конструкции выполнены геометрические модели изогнутого в полете крыла и проведено исследование обтекания повторно для каждого.

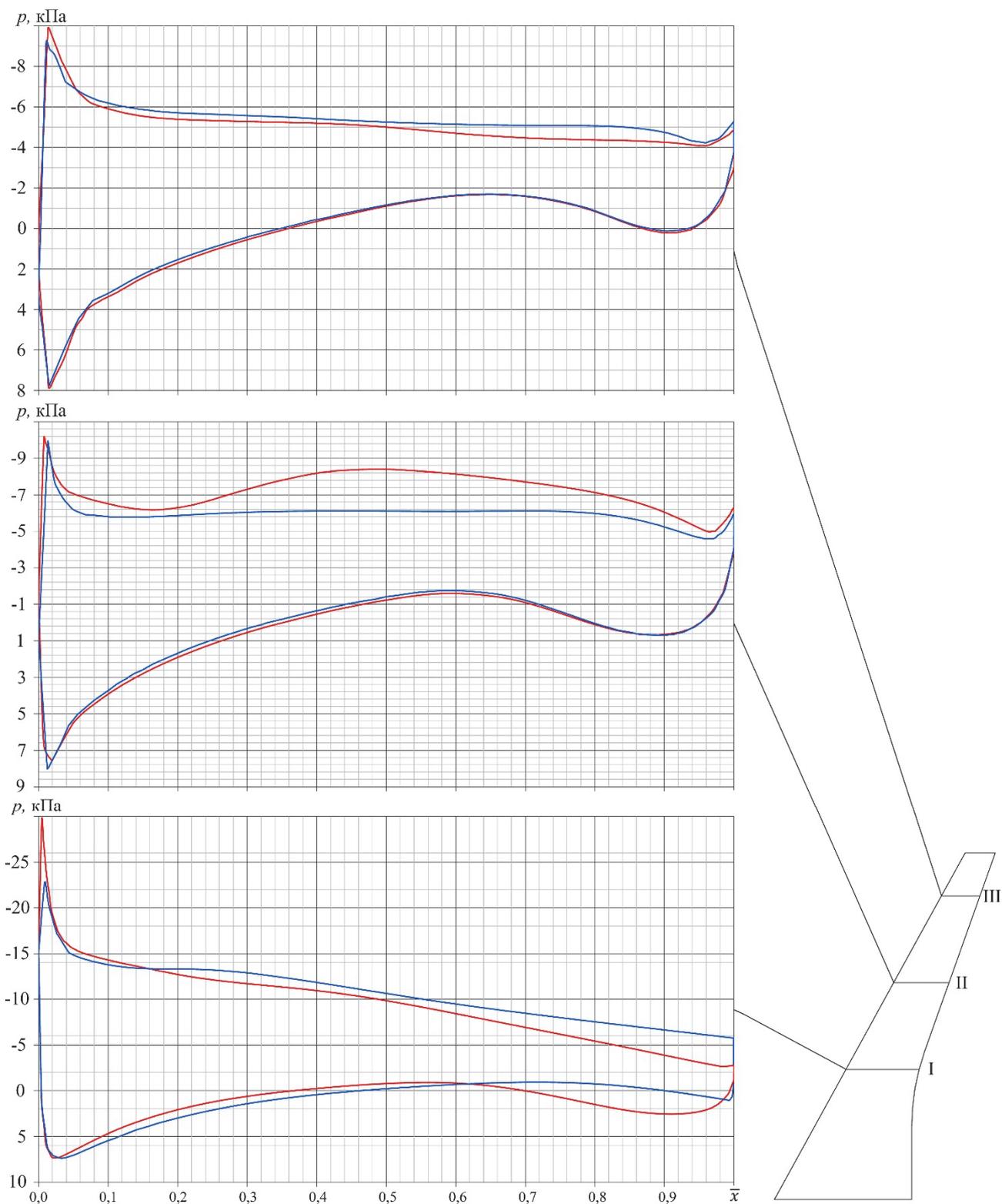
## 2. Результаты параметрического моделирования

В результате параметрического моделирования получены и проанализированы значения давления по крылу, температуры, характер обтекания крыла. Представлены графики распределения

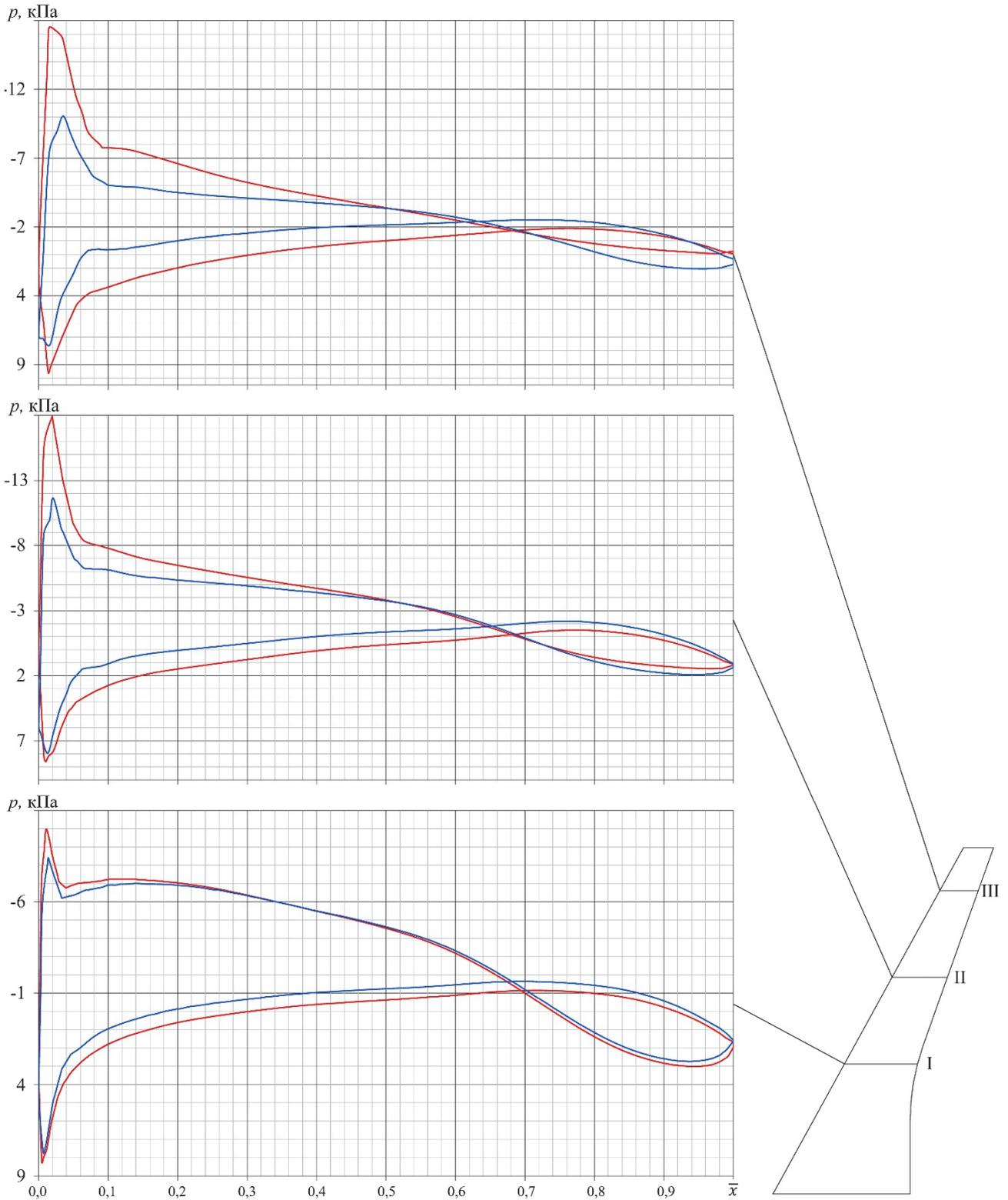
давления  $p(\bar{x})$  по профилю крыла в различных сечениях для рассмотренных вариантов нескольких расчетных случаев ( $0^\circ$  – рис. 4;  $+11^\circ$  – рис. 5;  $-7^\circ$  – рис. 6), где  $\bar{x}$  – относительная координата точки профиля.



**Рис. 4.** Распределения давления  $p(\bar{x})$  по профилю крыла при угле атаки  $\alpha = 0^\circ$ : недеформированное (—) и деформированное (—) крылья  
 [Figure 4. Air-load distribution  $p(\bar{x})$  over the wing profile at angle of attack  $\alpha = 0^\circ$ : undeformed (—) and deformed (—) wings]



**Рис. 5.** Распределения давления  $p(\bar{x})$  по профилю крыла при угле атаки  $\alpha = +11^\circ$ : недеформированное (—) и деформированное (—) крылья  
**[Figure 5.** Air-load distribution  $p(\bar{x})$  over the wing profile at angle of attack  $\alpha = +11^\circ$ : undeformed (—) and deformed (—) wings]



**Рис. 6.** Распределения давления  $p(\bar{x})$  по профилю крыла при угле атаки  $\alpha = -7^\circ$ : недеформированное (—) и деформированное (—) крылья

**[Figure 6.** Air-load distribution  $p(\bar{x})$  over the wing profile at angle of attack  $\alpha = -7^\circ$ : undeformed (—) and deformed (—) wings]

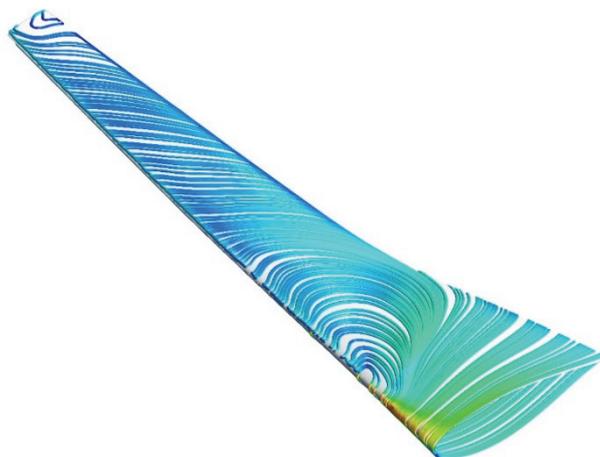
При угле атаки  $0^\circ$  в сечении I деформации минимальны, но больше, чем в корневом сечении, и составляют 0,5–1 %. Наибольшее различие в величинах давления наблюдается по носовой части наветренной стороны (крыло имеет крутку – угол установки у корня равен  $3^\circ$ ), максимальное различие составляет 1,5 %. В хвостовой и средней части сечения имеют одинаковый характер, различие не более 0,5 %. С увеличением деформации крыла изменяются и величины давлений. Для сечения II в носовой части, а также для нижней обшивки различие достигает 3 %. В концевой части крыла (сечение III), ввиду наибольшего отклонения, различие в значениях величины давления максимально и составляет 7 % в носовой части с уменьшением в хвостовой до 0,5 %. Значения для деформированного крыла выше. Стоит отметить, что для деформированного крыла при больших значениях само распределение имеет более плавный характер, графики давления сглаженные.

На угле атаки  $+11^\circ$  наблюдается снижение давления для деформированного крыла за счет того, что в некоторых областях не происходит срыв потока и не возникает турбулентных течений (рис. 7). В сечении I в хвостовой части профиль давления выравнивается и значения давления уменьшаются (различие составляет 5 %), повышенного давления по нижней обшивке не наблюдается. В носовой части снижается пик давления на 10 %. В сечении II на верхней обшивке, находящейся с наветренной стороны, для недеформированного крыла значения больше на 9 % (в данной области образуются завихрения), однако за счет изменения геометрии при деформации данного эффекта не возникает. Общий вид графиков имеет схожий характер, но для деформированного крыла более равномерен и сглажен.

Для угла атаки  $-7^\circ$  наблюдается как снижение давления за счет деформации (максимальное снижение давления составляет 19 % в зоне носовых частей), так и незначительное – до 3 % – увеличение (хвостовые части). Однако возникает общее снижение величины давлений. В средних частях разница между значениями не превышает 5 %.

При рассмотрении крыльев и деформаций при углах атаки  $0^\circ$ ,  $+11^\circ$  и  $-7^\circ$  не учитывались элементы механизации крыла, которые изменяют геометрию профиля и позволяют уйти от нега-

тивных эффектов вихреобразования или отсрочить их появление для больших значений углов атаки.



**Рис. 7.** Направление потока вблизи поверхности крыла при угле атаки  $+11^\circ$ , зоны образования завихрений  
**[Figure 7.** Airflow streamlines near the wing surface at an angle of attack of  $+11^\circ$ , the zone of formation of vortices]

## Заключение

В результате проведенного параметрического моделирования задачи внешней аэродинамики для крыла пассажирского самолета для нескольких режимов полета и различных углов атаки ( $0^\circ$ ,  $+11^\circ$ ,  $-7^\circ$ ) получены следующие результаты:

- установлен характер обтекания потоком и определено аэродинамическое давление для деформированных в полете и недеформированных крыльев;

- определено, что максимальное различие величин составляет 19 % в зоне носовой части крыла для пиковых значений давления (для деформированного крыла меньше).

Общее отличие деформированного крыла от недеформированного составляет 5–7 %, при этом в большей степени нагрузки снижаются, распределение давления становится равномерным (графики сглаживаются). Таким образом, на ранних этапах проектирования для определения нагрузок, действующих на крыло можно пренебречь деформациями, возникающими в полете, тем самым сократив время стадии определения нагрузок в несколько раз (в данной работе в 2,5 раза – снижение количества расчетов и моделирования с 10 до 4), а погрешность и завышение величин составит не более 7 %.

Результаты настоящей работы будут учтены и использованы при составлении комплексной методики проектирования крыла из ПКМ на основе параметрического моделирования.

### Список литературы

1. *Gagnon H., Zingg D.W.* High-fidelity Aerodynamic Shape Optimization of Unconventional Aircraft through Axial Deformation // 52<sup>nd</sup> Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum (National Harbor, 2014). AIAA Paper. 2014-0908. Pp. 1–18.
2. *Зленко Н.А., Курсаков И.А.* Оптимизация геометрии узла подвески мотогондолы под крылом пассажирского самолета на основании численных расчетов с использованием уравнений RANS // Ученые записки ЦАГИ. 2015. Т. 46. № 5. С. 21–38.
3. *Брагин Н.Н., Болсуновский А.Л., Бузоверя Н.П., Губанова М.А., Скоморохов С.И., Хозяинова Г.В.* Исследования по совершенствованию аэродинамики взлетно-посадочной механизации крыла пассажирского самолета // Ученые записки ЦАГИ. 2013. Т. 44. № 4. С. 1–14.
4. *Hann R.* UAV Icing: Comparison of LEWICE and FENSAP-ICE for Ice Accretion and Performance Degradation // 2018 Atmospheric and Space Environments Conference, AIAA Aviation Forum (Atlanta, 2018). AIAA Paper. 2018-2861. Pp. 1–8.
5. *Борисова Н.А., Горячев Д.В., Коцеев А.Б.* Оценка аэродинамических характеристик летательного аппарата при полете в условиях обледенения // Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. 45. № 6. С. 43–49.
6. *Schütte A.* Numerical investigations of the vortical flow on swept wings with round leading edges // 34<sup>th</sup> AIAA Applied Aerodynamics Conference (Washington, 2016). AIAA Paper. 2016-4172. Pp. 1–45.
7. *Barber T.J., Doig G., Beves C., Watson I., Diassinos S.* Synergistic integration of computational fluid dynamics and experimental fluid dynamics for ground effect aerodynamics studies // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part G. Journal of Aerospace Engineering. 2012. Vol. 226. No. 6. Pp. 602–619.
8. *Агеев Н.Д.* Численное исследование совместного влияния стреловидности передней кромки крыла и радиуса закругления носика профиля на аэродинамические характеристики крыла при сверхзвуковых скоростях // Труды МФТИ. 2013. Т. 5. № 4. С. 3–10.
9. *Горбунов В.Г., Дець Д.О., Желанников А.И., Сетуха А.В.* Моделирование обтекания самолетов на больших углах атаки вихревым методом // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. № 7. С. 10–13.
10. *Lyu Z., Martins J.R.R.A.* Aerodynamic Shape Optimization of an Adaptive Morphing Trailing Edge Wing // Journal of Aircraft. 2015. No. 52 (6). Pp. 1951–1970.
11. *Schuhmacher G., Murra I., Wang L., Laxander A., O'Leary O.J., Herold M.* Multidisciplinary Design Optimization of a Regional Aircraft Wing Box // 9<sup>th</sup> AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, Multidisciplinary Analysis Optimization Conference (Atlanta, 2002). AIAA Paper. 2002-5406. Pp. 1–10.
12. *Caixeta P.R., Marque S.F.D.* Neural network meta-model-based MDO for wing design considering aeroelastic constraints // 51<sup>st</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Structures, Structural Dynamics, and Materials and Co-located Conferences (Orlando, 2010). AIAA Paper. 2010-2762. Pp. 1–10.
13. *Лукиянов О.Е., Островой А.В., Мендес Сото М.А., Климов Е.А., Шахов В.Г.* Особенности аэродинамических характеристик беспилотных летательных аппаратов с крылом большого удлинения // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21. № 1. С. 30–39.
14. *Xiangyu Gu, Ciampa P.D., Nagel B.* High fidelity aerodynamic optimization in distributed overall aircraft design // 17<sup>th</sup> AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, AIAA Aviation Forum (Washington, 2016). AIAA Paper. 2016-3508. Pp. 1–19.
15. *Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Mikhailovskiy K.V., Shafikova I.R.* Material science problems of building space antennas with a transformable reflector 100 m in diameter // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 4<sup>th</sup> International Conference on Advanced Composites and Materials Technologies for Arduous Applications, ACMТAA 2015, 2016. 10 p.
16. *Prosuntsov P.V., Reznik S.V., Mikhaylovskii K.V., Belenkov E.S.* Multiscale modeling of the binder polymer composite materials heating using microwave radiation // Journal of Physics Conference Series. 2018. Vol. 1134. 012048. doi: 10.1088/1742-6596/1134/1/012047.
17. *Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Mikhailovskiy K.V.* Thermal regime of large space structure with transformable elements from hybrid composite // Journal of Physics: Conference Series. 7<sup>th</sup> International Conference on Functional Nanomaterials and High Purity Substances, FNM. 2018. 8 p.
18. *Михайловский К.В., Барановски С.В.* Методика проектирования крыла из полимерных композиционных материалов на основе параметрического моделирования. Ч. 1. Обоснование выбора геометрических размеров и расчет аэродинамических нагрузок на крыло // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 11 (680). С. 86–98.
19. *Михайловский К.В., Барановски С.В.* Методика проектирования крыла из полимерных композиционных материалов на основе параметрического моделирования. Ч. 2. Проектирование силовой конструкции // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 12 (681). С. 106–116.
20. *Михайловский К.В., Барановски С.В.* Определение аэродинамических нагрузок на крыло с учетом основных элементов авиалайнера при параметрическом моделировании // Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2018. № 5. С. 15–28.

#### Для цитирования

Барановски С.В., Михайловский К.В. Влияние учета деформации крыла при определении аэродинамических нагрузок на начальных этапах проектирования // Вест-

ник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 166–174. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-3-166-174>

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-3-166-174

Research article

## Assessment of wing deformation influence on airload determination at the initial design stages

Sergey V. Baranovski, Konstantin V. Mikhaylovskiy

Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology),  
5 2-ya Baumanskaya, bldg 1, Moscow, 105005, Russian Federation

#### Article history:

Received: April 14, 2020

Revised: April 26, 2020

Accepted: July 27, 2020

#### Keywords:

airliner, wing, airload, aerodynamic pressing, airfoil flow, finite elements

*Abstract.* At designing aircraft, much attention is given to the wing, as one of the most critical elements of the airframe. It is necessary to have a clear-eyed outlook at response sequence, efficiency of various factors and calculation features on the receipt timing and quality of the result. In addition, the design of a structural element is a complex multidisciplinary task affecting various fields of science, which is complicated by the use of polymer composite materials. In the furtherance of solving the urgent task of the methods of designing of a polymer composite wing, it is necessary to determine the influence of wing deformation on the airload used in the calculation and determination of product parameters. Methods of designing of a polymer composite wing used at the initial stages and taking into account the choice of the external appearance, justification of the structural arrangement and load-bearing elements. The paper considers the flow of air over the wing of a passenger airliner and analyzes the pressure values for various flight modes. A comparison is made of the initial theoretical wing surface and deformed during flight, and the difference in loading of the considered options is determined. A future methodology of polymer composite wing design based on parametric modelling will take these results into account and make use of them.

#### References

1. Gagnon H, Zingg DW. High-fidelity aerodynamic shape optimization of unconventional aircraft through axial deformation. *52<sup>nd</sup> Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum (National Harbor, 2014)*. AIAA Paper. 2014-0908. p. 1–18.

2. Zlenko NA, Kursakov IA. Optimizatsiya geometrii uzla podveski motogondoly pod krylom passazhirskogo samoleta na osnovanii chislennykh raschetov s ispol'zovaniem uravnenii RANS [Geometry optimization of motor-gondola attachment lug under the wing of passenger aircraft

based on numerical calculations using RANS equations]. *TsAGI Science Journal*. 2015;46(5):21–38. (In Russ.)

3. Bragin NN, Bolsunovskiy AL, Buzoverya NP, et al. Issledovaniya po sovershenstvovaniyu aerodinamiki vzletno-posadochnoi mekhanizatsii kryla passazhirskogo samoleta [Research on improvement of high lift devices aerodynamics of passenger plane]. *TsAGI Science Journal*. 2013;44(4):1–14. (In Russ.)

4. Hann R. UAV Icing: Comparison of LEWICE and FENSAP-ICE for Ice Accretion and Performance Degradation. *2018 Atmospheric and Space Environments Conference, AIAA Aviation Forum (Atlanta, 2018)*. AIAA Paper. 2018-2861. p. 1–8.

5. Borisova NA, Goryachev DV, Koshcheyev AB. Otsenka aerodinamicheskikh kharakteristik letatel'nogo apparata pri polete v usloviyakh obledeneniya [Evaluation of aerodynamic characteristics of the aircraft during

*Sergey V. Baranovski*, postgraduate student, assistant lecturer of the Department SM-13 Rocket and Space Composite Structures of the Bauman MSTU; eLIBRARY SPIN-code: 6154-8493.

*Konstantin V. Mikhaylovskiy*, Associate Professor of the Department SM-13 Rocket and Space Composite Structures of the Bauman MSTU; Candidate of Science (Eng.); eLIBRARY SPIN-code: 6481-7346; Scopus Author ID: 57204666941; [Konst\\_mi@mail.ru](mailto:Konst_mi@mail.ru)

flight in icing conditions]. *TsAGI Science Journal*. 2014; 45(6):43–49. (In Russ.)

6. Schütte A. Numerical investigations of the vortical flow on swept wings with round leading edges. *34<sup>th</sup> AIAA Applied Aerodynamics Conference (Washington, 2016)*. AIAA Paper. 2016-4172. p. 1–45.

7. Barber TJ, Doig G, Beves C, Watson I, Diasinos S. Synergistic integration of computational fluid dynamics and experimental fluid dynamics for ground effect aerodynamics studies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part G. Journal of Aerospace Engineering*. 2012;226(6):602–619.

8. Ageev ND. Chislennoe issledovanie sovместnogo vliyaniya strelovidnosti perednei kromki kryla i radiusa zakrugleniya nosika profilya na aerodinamicheskie kharakteristiki kryla pri sverkhzvukovykh skorostyakh [A numerical study of the joint effect of wing leading edge sweep and the profile nose radius of curvature of the on the wing aerodynamic characteristics at supersonic speeds]. *Proceedings of MIPT*. 2013;5(4):3–10. (In Russ.)

9. Gorbunov VG, Dets DO, Zhelannikov AI, Setukha A.V. Modelirovanie obtekaniya samoletov na bol'shikh uglakh ataki vikhrevym metodom [Flow over aircraft simulation by using the discrete singularity method]. *Civil Aviation High Technologies*. 2012;177:10–13. (In Russ.)

10. Lyu Z, Martins JRRA. Aerodynamic Shape Optimization of an Adaptive Morphing Trailing Edge Wing. *Journal of Aircraft*. 2015;52(6):1951–1970.

11. Schuhmacher G, Murra I, Wang L, Laxander A, O'Leary OJ, Herold M. Multidisciplinary Design Optimization of a Regional Aircraft Wing Box. *9<sup>th</sup> AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, Multidisciplinary Analysis Optimization Conferences (Atlanta, 2002)*. AIAA Paper. 2002-5406. p. 1–10.

12. Caixeta PR, Marque SFD. Neural network meta-model-based MDO for wing design considering aeroelastic constraints. *51<sup>st</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Structures, Structural Dynamics, and Materials and Co-located Conferences (Orlando, 2010)*. AIAA Paper. 2010-2762. p. 1–10.

13. Lukyanov OE, Ostrovoy AV, Mendes Soto MA, Klimov EA, Shakhov VG. Osobennosti aerodinamicheskikh kharakteristik bespilotnykh letatel'nykh apparatov s krylom bol'shogo udlineniya [Special characteristics of aerodynamic properties of unmanned aircraft with the high-aspect-ratio wing]. *Civil Aviation High Technologies*. 2018;21(01):30–39. (In Russ.)

14. Xiangyu Gu, Ciampa PD, Nagel B. High fidelity aerodynamic optimization in distributed overall aircraft design. *17<sup>th</sup> AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and*

*Optimization Conference, AIAA Aviation Forum (Washington, 2016)*. AIAA Paper. 2016-3508. p. 1–19.

15. Reznik SV, Prosuntsov PV, Mikhailovsky KV, Shafikova IR. Material science problems of building space antennas with a transformable reflector 100 m in diameter. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 4<sup>th</sup> International Conference on Advanced Composites and Materials Technologies for Arduous Applications, ACMTAA 2015, 2016*. p. 1–10

16. Prosuntsov PV, Reznik SV, Mikhaylovskii KV, Belenkov ES. Multiscale modeling of the binder polymer composite materials heating using microwave radiation. *Journal of Physics Conference Series*. 2018;1134:012048. doi: 10.1088/1742-6596/1134/1/012047.

17. Reznik SV, Prosuntsov PV, Mikhailovsky KV. Thermal regime of large space structure with transformable elements from hybrid composite. *Journal of Physics: Conference Series. 7<sup>th</sup> International Conference on Functional Nanomaterials and High Purity Substances, FNM*. 2018:1–8.

18. Mikhaylovskiy KV, Baranovski SV. Metodika proektirovaniya kryla iz polimernykh kompozitsionnykh materialov na osnove parametricheskogo modelirovaniya. Ch. 1. Obosnovanie vybora geometricheskikh razmerov i raschet aerodinamicheskikh nagruzok na krylo [The Methods of Designing a Polymer Composite Wing Using Parametrical Modeling. Part 1. The Rationale for Selecting Wing Geometry and the Calculation of Airloads]. *Machine Building*. 2016;11:86–98. (In Russ.)

19. Mikhaylovskiy KV, Baranovski SV. Metodika proektirovaniya kryla iz polimernykh kompozitsionnykh materialov na osnove parametricheskogo modelirovaniya. Ch. 2. Proektirovanie silovoi konstruksii [The Methods of Designing a Polymer Composite Wing Using Parametrical Modeling. Part 2. Design of the load bearing structure]. *Machine Building*. 2016;12:106–116. (In Russ.)

20. Mikhaylovskiy KV, Baranovski SV. Opredelenie aerodinamicheskikh nagruzok na krylo s uchedom osnovnykh elementov avialainera pri parametricheskom modelirovanii [Determining aerodynamic loads affecting an aircraft wing during parametric modelling taking the main airliner components into account]. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*. 2018;5:15–28. (In Russ.)

#### For citation

Baranovski SV, Mikhaylovskiy KV. Assessment of wing deformation influence on airload determination at the initial design stages. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(3):166–174. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-3-166-174>



## МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-3-175-180

УДК 629.113.004.67

Научная статья

### Снижение износа юбок поршней двигателей внутреннего сгорания

А.Р. Асоян<sup>а</sup>, А.С. Горшков<sup>б</sup>, А.Х. Израелян<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет,  
Российская Федерация, 125319, Москва, Ленинградский пр-кт, д. 64

<sup>б</sup>Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

#### История статьи:

Поступила в редакцию: 22 декабря 2019 г.

Доработана: 22 апреля 2020 г.

Принята к публикации: 23 июля 2020 г.

#### Ключевые слова:

поверхностно-пластическое деформирование, повышение эксплуатационного ресурса поршня, снижения коэффициента трения, двигатель внутреннего сгорания

*Аннотация.* Значительная доля механических потерь в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) приходится на цилиндропоршневую группу. В зависимости от режимов работы двигателя внутреннего сгорания возможно контактное взаимодействие в паре «поршень – цилиндр», что приводит к износу рабочих поверхностей ресурсопределяющих элементов и снижению эксплуатационного ресурса силового агрегата в целом. В связи с этим снижение потерь на трение в элементах ДВС и, в частности, сопряжении «поршень – гильза цилиндров» является актуальным. Решением данных задач занимаются как отечественные, так и зарубежные исследователи, предложены различные профили поршней, методы расчета параметров масляного слоя, но практическое состояние вопроса обуславливает актуальность исследований в этом направлении. В работе рассмотрена возможность снижения износа юбок поршней за счет уменьшения контактной поверхности в сопряжении и обеспечения масляной пленки в зоне трения не зависимо от режимов работы двигателя. Данная возможность реализуется путем формирования определенного макропрофиля на рабочей поверхности юбки поршня. Формирование макро рельефа производилось путем поверхностного пластического деформирования с возвратно-поступательным перемещением сферического инструмента по обрабатываемой поверхности.

#### Введение

В процессе работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС) наиболее нагруженными являются элементы цилиндропоршневой группы [1; 2].

*Асоян Артур Рафикович*, профессор кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервис» МАДИ; доцент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН; доктор технических наук, доцент; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1976-9376>; [asoyan.ar@mail.ru](mailto:asoyan.ar@mail.ru)  
*Горшков Александр Сергеевич*, аспирант департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН.  
*Израелян Ани Хачатуровна*, аспирант департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН.

© Асоян А.Р., Горшков А.С., Израелян А.Х., 2020

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



Особенность ДВС заключается в многофакторности показателей надежности и большом диапазоне условий и режимов эксплуатации. Аварийный режим складывается из суммарного действия многих, в том числе случайных, факторов [3]. Обеспечение надежной и долговечной работы двигателей внутреннего сгорания – основная задача двигателестроителей. Главным узлом ДВС является цилиндропоршневая группа (ЦПГ), надежная и долговечная работа которой является важным условием для достижения высоких эффективных показателей двигателя в целом [4].

Общеизвестно, что сила давления газов нагружает поршни, гильзы цилиндров, головку блока и другие элементы, вызывая в них напряжения изгиба. В процессе рабочего цикла сила меняет свою величину и может быть определена по индикаторной диаграмме

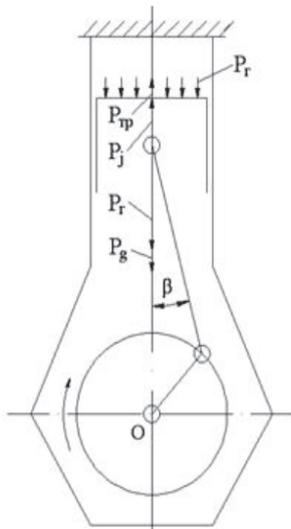
$$P_{\Gamma} = f(S) \text{ или } P_{\Gamma} = f(V),$$

где  $S$  – ход поршня, м;  $V$  – объем цилиндра ( $V_h + V_c$ ), м<sup>3</sup> или расчетом.

На кривошипно-шатунный механизм действуют давление газов  $P_{\Gamma}$ , силы инерции  $P_j$ , силы веса  $P_g$  и силы трения  $P_{\text{тр}}$  (рис. 1).

Суммарная движущая сила будет равна:

$$P_{\Sigma} = P_{\Gamma} + P_j + P_g + P_{\text{тр}}. \quad (1)$$



**Рис. 1.** Силы, действующие в кривошипно-шатунном механизме  
[Figure 1. Forces acting in a crank arm]

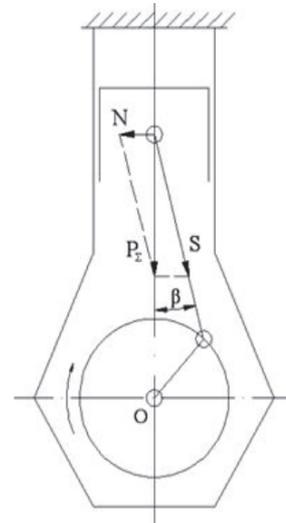
Действующая на поршень сила  $P_{\Gamma}$  направлена вниз и в совокупности с силами инерции нагружает поршень. Давление газов и сила инерции действуют в направлении оси цилиндра (рис. 1) и по ходу движения поршня, меняют свою величину, достигая максимумов в «мертвых» точках поршня.

На первой половине хода поршня от верхней мертвой точки к нижней мертвой точке (рис. 2) сила  $P_j$  направлена вверх и препятствует движению поршня (в этот период работа силы инерции отрицательна), а на второй половине хода поршня сила инерции положительна (направлена вниз) и таким образом способствует движению поршня [5].

Сила давления газов определяется по формуле

$$P_{\Gamma} = (p_{\Gamma} - p_0)F_{\text{П}}, \quad (2)$$

где  $p_{\Gamma}$  – давление газов в цилиндре, МПа;  $p_0$  – давление под поршнем, давление в картере двигателя, МПа;  $F_{\text{П}}$  – площадь поршня, м<sup>2</sup>.



**Рис. 2.** Разложение суммарной движущей силы в кривошипно-шатунном механизме  
[Figure 2. Decomposition of the total driving force in crank]

Внешней нагрузкой юбки поршня является боковая сила – совокупность действий газовых и инерционных сил [6].

Приложив силу  $P_{\Sigma}$ , определим нормальное усилие  $N$ , действующее на юбку поршня (боковую силу),

$$N = P_{\Sigma} \operatorname{tg} \beta, \quad (3)$$

где  $\beta = \arcsin(\lambda \sin \varphi)$  – угол отклонения оси шатуна от оси цилиндра и усилие, направленное вдоль оси шатуна,

$$S = P_{\Sigma} / \cos \beta, \quad (4)$$

Сила  $N$  прижимает поршень к стенкам цилиндра, вызывает перекадку поршня в цилиндре, влияет на трение и износ поверхностей цилиндра и поршня. Сопутствующим фактором при этом является скорость движения поршня.

Описанные элементы относятся к динамически нагруженным, для которых, как обосновано в работах Ф.Н. Авдотькина [7; 8], справедлива экспоненциальная зависимость износа  $l$  от нагрузки:

$$l = S_0 e^{bl}, \quad (5)$$

где  $S_0$  – износ в конце периода приработки, приведенный к началу эксплуатации;  $b$  – изменение интенсивности изнашивания на единицу износа.

Характер действующих нагрузок на рабочую поверхность гильзы цилиндров и поршень обуславливает изменение формы рабочих поверхностей описанных элементов в виде овальности, которая в процессе эксплуатации возрастает.

С целью снижения коэффициента трения при касании юбок поршней о стенки цилиндров в процессе эксплуатации при производстве поршней на рабочую часть юбок поршней наносят антифрикционное твердосмазочное покрытие на основе мелкодисперсного дисульфида молибдена и графита, полимер тетрафторэтилена (тефлон) и др.



**Рис. 3.** Износ антифрикционного покрытия на юбке поршня  
[Figure 3. Wear of the anti-friction coating on the piston skirt]

Но практика показывает, что используемая технология с применением антифрикционного твердосмазочного покрытия малоэффективна, и при контакте рабочих поверхностей происходит

истирание нанесенного покрытия (рис. 3), особенно при граничных условиях смазки сопрягаемых поверхностей (при запуске двигателя). Первоначальный запуск двигателя соответствует высокому износу и расходу топлива – примерно на 10 % больше, чем в нормальных условиях эксплуатации, вследствие отсутствия смазывающей жидкости между трущимися деталями, ввиду ее стекания с течением времени [9].

Известно, что в зависимости от режимов работы двигателя основную долю режимов трения в сопряжении «поршень – цилиндр» занимает гидродинамический режим – 52 %, далее следуют смешанный – 39 % и граничный – 9 % [10; 11].

В общем случае сила трения  $F_{mp}$  определяется по формуле

$$F_{mp} = S (\mu v / h), \quad (6)$$

где  $S$  – площадь поверхности трения;  $\mu$  – вязкость масла;  $v$  – скорость скольжения поверхностей относительно друг друга;  $h$  – толщина масляного слоя.

Таким образом, потери на трение можно снизить, увеличив толщину масляного слоя ( $h$ ). Но в рассматриваемом случае толщина масляного слоя ограничивается величиной зазора в сопряжении, который мы не можем изменить.

## 2. Моделирование процесса

Коэффициент трения можно снизить за счет уменьшения площади контактной поверхности и локального увеличения толщины масляного слоя в специально сформированных макрополостях. Для этого предлагается на рабочей поверхности юбок поршней производить формирование определенного макрорельефа с целью снижения контактной поверхности и удержания масла в образованных полостях, что позволит гарантированно обеспечивать масляный слой между соприкасающимися поверхностями.

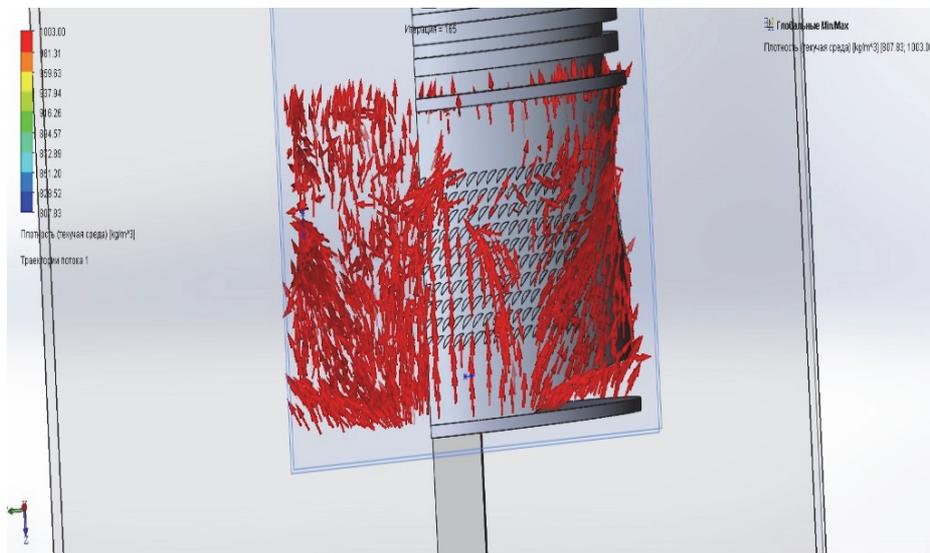
В ходе исследования производилось моделирование процесса работы поршня с сформированным макропрофилем на рабочей поверхности юбки (рис. 4).

Система автоматизированного проектирования включает широкий набор различных функций трехмерного моделирования твердых тел, что важно при работе со сложными моделями узлов и деталей во время проектирования изделий. В используемом программном обеспечении

моделировалось течение потоков жидкости по заданным направлениям [12–14].

Формирование макрорельефа производилось путем поверхностного пластического деформи-

рования с возвратно-поступательным перемещением сферического инструмента по обрабатываемой поверхности. В результате на поверхности образовался синусоидальный профиль (рис. 5) [15].



**Рис. 4.** Моделирование процесса работы поршня с сформированным макропрофилем на рабочей поверхности юбки [Figure 4. Modeling of the piston operation with the formed macro profile on the working surface of the skirt]



**Рис. 5.** Профиль образуемого макрорельефа [Figure 5. Profile of the formed macrorelief]

Сформированные углубления на поверхности юбки поршня способствуют удержанию масла в рабочей зоне независимо от режимов работы двигателя.

Дальнейшее исследование направлено на определение оптимального рисунка макропрофиля и места расположения его на юбке поршня.

### Заключение

Предложено техническое решение, позволяющее снизить коэффициент трения в паре «поршень – цилиндр» при любых режимах работы двигателя и повысить эксплуатационный ресурс поршня.

### Список литературы

1. Луканин В.Н., Алексеев И.В., Шатров М.Г. и др. Двигатели внутреннего сгорания: в 3 кн. Кн. 2. Динамика и конструирование: учебник / под ред. В.Н. Луканина. М.: Высшая школа, 1995. 319 с.
2. Чайнов Н.Д. и др. Конструирование двигателей внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 2008. 496 с.
3. Коченов В.А. Определение причин преждевременных отказов двигателей внутреннего сгорания // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. 2013. № 2 (58). С. 47–49.
4. Бутусов И.А., Дударева Н.Ю. Исследование влияния микродугового окисления на износостойкость поршня ДВС // Наука и образование: научное издание МГТУ имени Н.Э. Баумана. 2013. № 9. С. 127–144. doi: 10.7463/0913.0606017.

5. Возницкий И.В., Пунда А.С. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Т. 1. 2-е изд., перераб. и доп. М.: МОРКНИГА, 2010. С. 20.

6. Путинцев С.В. Механические потери в поршневых двигателях: специальные главы конструирования, расчета и испытаний. М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2011. С. 58.

7. Авдонькин Ф.Н. Оптимизация изменения технического состояния автомобиля. М.: Транспорт, 1993. 352 с.

8. Авдонькин Ф.Н. Теоретические основы технической эксплуатации автомобилей. М.: Транспорт, 1985. 215 с.

9. Roberts A., Brooks R., Shipway P. Internal combustion engine cold-start efficiency: a review of the problem, causes and potential solutions // *Energy Conversion and Management*. 2014. Vol. 82. Pp. 327–350.

10. Путинцев С.В. Механические потери в поршневых двигателях: специальные главы конструирования, расчета и испытаний. М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2011. С. 41–42.

11. Шабашевич Б.Э., Адамович А.В. Исследование потерь на трение в поршневой группе дизеля Д-50 // *Тракторы и сельхозмашины*. 1970. № 8. С. 13–15.

12. Гузнецов В.Н., Журбенко П.А., Бондарева Т.П. SolidWorks 2016, трехмерное моделирование деталей

и выполнение электронных чертежей. М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2017.

13. Блаховский Х.П. Новый метод разработки двигателей – концепция виртуального двигателя. URL: <http://aps-c.ru/publications/virtual.pdf> (дата обращения: 20.04.2020).

14. Опыт фирмы AVL List GmbH в применении методов моделирования для разработки двигателей и автомобилей. URL: <http://docplayer.ru/31416776-Опыт-фирмы-avl-list-gmbh-v-primenenii-metodov-modelirovaniya-dlya-razrabotki-dvigatelyey-i-avtomobiley.html> (дата обращения: 20.04.2020).

15. Пушкарев Д.В., Батинов И.В. Формирование регулярного микрорельефа в отверстиях малого диаметра // *Технические науки – от теории к практике*: сб. ст. по матер. XXXIII Междунар. науч.-практ. конф. № 4(29). Новосибирск: СибАК, 2014.

#### Для цитирования

Асоян А.Р., Горшков А.С., Израелян А.Х. Снижение износа юбок поршней двигателей внутреннего сгорания // *Вестник Российского университета дружбы народов*. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 175–180. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-3-175-180>

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-3-175-180

Research article

## Less wear on the piston skirts of internal combustion engines

Arthur R. Asoyan<sup>a</sup>, Alexander S. Gorshkov<sup>b</sup>, Ani H. Israelyan<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Moscow Automobile and Road State Technical University, 64 Leningradskii Ave, Moscow, 125319, Russian Federation

<sup>b</sup>Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

#### Article history:

Received: December 22, 2019

Revised: April 22, 2020

Accepted: April 23, 2020

#### Keywords:

surface-plastic deformation, increasing the service life of the piston, reducing the coefficient of friction, internal combustion engine

*Abstract.* A significant proportion of mechanical losses in internal combustion engines accounted for mechanical losses in the cylinder-piston group. Depending on the operating modes of the internal combustion engine, contact interaction in the piston-cylinder pair is possible, which leads to wear of the working surfaces of the resource-determining elements and a decrease in the operational life of the power unit as a whole, in connection with which the reduction of friction losses in the internal combustion engine elements and the piston – cylinder liner coupling in particular is relevant. Both domestic and foreign researchers are engaged in the solution of the above described problems, various profiles of pistons, methods of calculating the parameters of the oil layer are proposed, but the practical state of the issue determines the relevance of research in this direction. The paper considers the possibility of reducing the wear of piston skirts by reducing the contact surface in conjugation and providing an oil film in the friction zone, regardless of engine operating conditions. This opportunity is realized by forming a certain macro profile on the working surface of the piston skirt. The formation of the macrorelief was carried out by means of surface plastic deformation, with the reciprocating movement of a spherical tool on the machined surface.

Arthur R. Asoyan, Professor of the Department of Automotive Transport and Car Service of the MADI; Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering of the Academy of Engineering of the RUDN University; Doctor of Technical Sciences; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1976-9376>; asoyan.ar@mail.ru

Alexander S. Gorshkov, graduate student of the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering of the Academy of Engineering of the RUDN University.

Ani H. Israelyan, graduate student of the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering of the Academy of Engineering of the RUDN University.

## References

1. Lukanin VN, Alekseev IV, Shatrov MG, et al. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Kn. 2. Dinamika i konstruirovaniye* [Internal combustion engines. Part 2. Dynamics and design]. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1995. (In Russ.)
2. Chainov ND, et al. *Konstruirovaniye dvigatelei vnutrennego sgoraniya* [Design of internal combustion engines]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2008. (In Russ.)
3. Kochenov VA. Opredeleniye prichin prezhdvremennykh otkazov dvigatelej vnutrennego sgoraniya [Determining the causes of premature failures of internal combustion engines]. *Vestnik FGOU VPO MGAU*. 2013;2(58):47–49. (In Russ.)
4. Butusov IA, Dudareva NYu. Influence of micro-arc oxidation on durability of IC-engine's piston. *Science and Education of the Bauman MSTU*. 2013;9:127–144. doi: 10.7463/0913.0606017. (In Russ.)
5. Voznitskii IV, Punda AS. *Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniya* [Marine internal combustion engines]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow: MORKNIGA Publ.; 2010. p. 20. (In Russ.)
6. Putintsev SV. *Mekhanicheskie poteri v porshnevnykh dvigatelyakh: spetsial'nye glavy konstruirovaniya, rascheta i ispytaniy* [Mechanical losses in piston engines: special chapters of design, calculation and testing]. Moscow: Bauman MSTU Publ.; 2011. p. 58. (In Russ.)
7. Avdonkin FN. *Optimizatsiya izmeneniya tekhnicheskogo sostoyaniya avtomobilya* [Optimization of changes in the technical condition of a car]. Moscow: Transport Publ.; 1993.
8. Avdonkin FN. *Teoreticheskie osnovy tekhnicheskoi ekspluatatsii avtomobilei* [Theoretical foundations of the technical operation of cars]. Moscow: Transport Publ.; 1985. (In Russ.)
9. Roberts A, Brooks R, Shipway P. Internal combustion engine cold-start efficiency: a review of the problem, causes and potential solutions. *Energy Conversion and Management*. 2014;82:327–350.
10. Putintsev SV. *Mekhanicheskie poteri v porshnevnykh dvigatelyakh: spetsial'nye glavy konstruirovaniya, rascheta i ispytaniy* [Mechanical losses in piston engines: special chapters for design, calculation and testing]. Moscow: Bauman MSTU Publ.; 2011. p. 41–42. (In Russ.)
11. Shabashevich BE, Adamovich AV. Issledovaniye poteri na treniye v porshnevoi gruppe dizelya D-50 [The study of friction losses in the piston group of a D-50 diesel]. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and agricultural machinery]. 1970;(8):13–15. (In Russ.)
12. Guznenkov VN, Zhurbenko PA, Bondareva TP. SolidWorks 2016, trekhmernoe modelirovaniye detalei i vypolneniye elektronnykh chertezhei [SolidWorks 2016, three-dimensional modeling of parts and the implementation of electronic drawings]. Moscow: Bauman MSTU Publ.; 2017. (In Russ.)
13. Blakhovskii KhP. *Novyi metod razrabotki dvigatelei – kontseptsiya virtual'nogo dvigatelya* [A new method of engine development – the concept of a virtual engine]. (In Russ.) Available from: <http://aps-c.ru/publications/virtual.pdf> (accessed: 20.04.2020).
14. *Opyt firmy AVL List GmbH v primenenii metodov modelirovaniya dlya razrabotki dvigatelei i avtomobilei* [Experience of AVL List GmbH in the application of modeling methods for the development of engines and automobiles]. (In Russ.) Available from: <http://docplayer.ru/31416776-Opyt-firmy-avl-list-gmbh-v-primenenii-metodov-modelirovaniya-dlya-razrabotki-dvigatelay-i-avtomobiley.html> (accessed: 20.04.2020).
15. Pushkarev DV, Batinov IV. Formirovaniye regul'yarnogo mikrorel'efa v otverstiyakh malogo diametra [Formation of a regular micro-relief in holes of a small diameter]. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike* [Technical sciences – from theory to practice]: collection of articles of materials of the XXXIII International scientific and practical conference. 2014;4(29). (In Russ.)

## For citation

Asoyan AR, Gorshkov AS, Israelyan AH. Less wear on the piston skirts of internal combustion engines. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(3):175–180. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-3-175-180>



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-3-181-188

УДК 622.23.05.

Научная статья

## Работоспособность валковой тарельчатой мельницы для помола цемента

Н.В. Калягина<sup>а</sup>, И.И. Карпунин<sup>б</sup>, А.В. Корнилова<sup>с</sup>, И.Н. Сильверстов<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),  
Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

<sup>б</sup>ЗАО «Прочность», Российская Федерация, 109428, Москва, Рязанский пр-кт, д. 8а

<sup>с</sup>Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

### История статьи:

Поступила в редакцию: 9 июня 2020 г.

Доработана: 9 июня 2020 г.

Принята к публикации: 9 июля 2020 г.

### Ключевые слова:

валковая мельница, тарельчатые валки, напряженно-деформированное состояние, контактные напряжения, трение, износ

**Аннотация.** Машиностроение для цементной промышленности – составная часть тяжелой промышленности. Цементная отрасль является основным поставщиком сырья для производства бетона и железобетона. Для помола цемента используют два типа мельниц – шаровую и валковую. Последние десятилетия доказали большую эффективность вертикальной валковой мельницы для помола сырья. Ее эффективность в сочетании с осуществлением сушки, помола и сепарации в одном агрегате дает ей неоспоримое преимущество перед шаровой мельницей. Этим объясняется существенное увеличение доли валковых мельниц на рынке цементных мельниц. Процесс измельчения в таких мельницах происходит за счет истирания, соответственно, в процессе работы происходит износ трущихся деталей мельницы. В работе проведена оценка работоспособности мельницы с гладкими тарельчатыми валками. В процессе исследования была выявлена причина разрушения секторов мельницы производства компании FLSmidth, эксплуатирующейся на территории Российской Федерации. Проведенное исследование выявило причины разрушения деталей валковой мельницы: при одновременном воздействии рабочей нагрузки и смещения секторов, возникающего из-за интенсивного износа, суммарные эквивалентные напряжения превышают значение предела выносливости при циклическом нагружении. Следовательно, происходит накопление усталостной повреждаемости материала, формирование и рост трещин, что отрицательно сказывается на работоспособности мельницы. Предложен ряд мер для повышения работоспособности мельниц такой конструкции.

## Введение

Известно, что для помола цемента используют шаровые и валковые мельницы. Первая конструкция шаровых мельниц была запатентована

во Франции более 120 лет назад. Долгое время эта конструкция не имела конкурентоспособных альтернатив. Однако в последние десятилетия она активно вытесняется с рынка валковыми мельницами. Эти мельницы позволяют проводить операции сушки, помола и сепарации в одном агрегате [1]. В работе [2] проведено сравнение опыта эксплуатации шаровой мельницы и первой валковой вертикальной мельницы, введенной в эксплуатацию в США в 2002 г. В [3] описано аналогичное многофакторное исследование, проведенное в Люксембурге. Показано, что валковые мельницы менее энергоемкие, чем аналоги, но более чувствительны к качеству сырья и более слож-

**Калягина Надежда Вячеславовна**, доцент кафедры прикладной механики факультета робототехники и комплексной автоматизации МГТУ имени Н.Э. Баумана; кандидат физико-математических наук, доцент; eLIBRARY Author ID: 633555, Scopus Author ID: 57164817100.

**Карпунин Иван Иванович**, генеральный директор.

**Корнилова Анна Владимировна**, профессор департамента строительства Инженерной академии РУДН; доктор технических наук; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5569-9320>, eLIBRARY SPIN-код: 6569-6240, Author ID: 351426, Web of Science ResearcherID: U-3353-2017, Scopus Author ID: 7004499009; [kornilova-av@rudn.ru](mailto:kornilova-av@rudn.ru)

**Сильверстов Игорь Николаевич**, главный инженер; кандидат технических наук.

© Калягина Н.В., Карпунин И.И., Корнилова А.В., Сильверстов И.Н., 2020

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



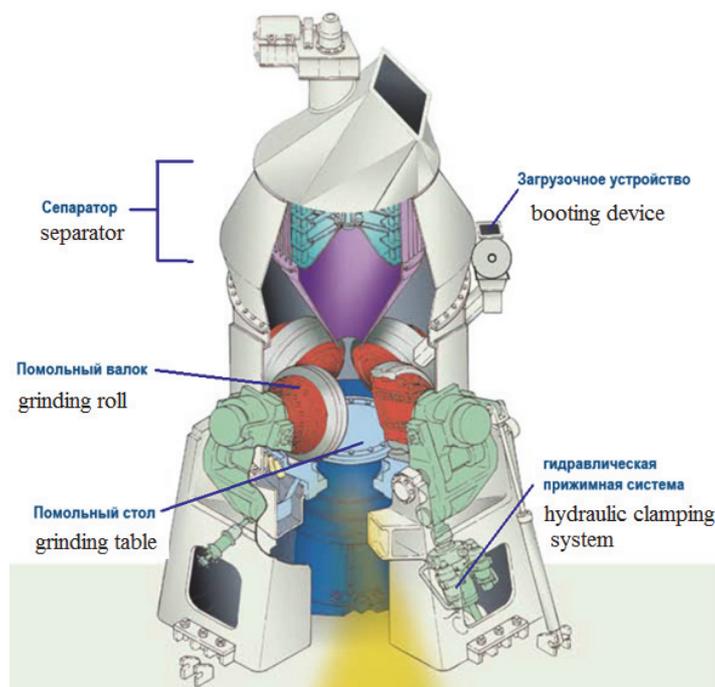
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ны в техническом обслуживании. Кроме того, стоимость валковой мельницы обычно выше, но этот недостаток компенсируется высокой производительностью [4; 5]. Главной проблемой при эксплуатации валковых мельниц является интенсивный износ трущихся деталей [6], оказывающий преобладающее влияние на их работоспособность. Целью настоящего исследования является разработка математической модели контактной задачи расчета напряженно-деформированного со-

стояния (НДС) валковой мельницы и технических мероприятий, продлевающих срок ее службы.

### 1. Объект исследования

Объектом исследования является валковая тарельчатая мельница с гладкими тарельчатыми валками, предназначенная для измельчения материала методом истирания производства компании FLSmidth (отделение в России «ООО ФЛСмидт Рус») (рис. 1).



**Рис. 1.** Конструкция исследуемой валковой мельницы  
[Figure 1. The design of the investigated roller mill]



**Рис. 2.** Разрушение секторов в области их контакта между собой  
[Figure 2. Destruction of sectors in the area of their contact with each other]

Мельница состоит из трех помольных валков, движущихся по помольному столу. Мелющие валки вместе с общей для них нажимной рамой, оснащенной тремя тягами, образуют статически определимую систему, создающую равномерное распределение нагрузки на слой размалываемого продукта. Каждый мелющий валок подвижно соединен через нажимной элемент с нажимной рамой и может выполнять качающиеся боковые движения. В связи с этим и благодаря пружинной подвеске натяжной системы мелющие валки могут оптимально прижиматься к рабочей поверхности мелющего диска. Размалываемый продукт, попадающий в мельницу при загрузке, затягивается в промежуток между мелющими валками и мелющим диском, где подвергается измельчению. Необходимые для измельчения усилия создаются в результате прижатия мелющих валков к мелющему диску. Давление прижатия осуществляется с помощью гидропневматической натяжной системы и может быть изменено во время процесса. Измельчаемый продукт подвергается размолу под действием сил давления и сдвига.

В процессе работы происходит износ трущихся деталей мельницы. Наибольшему износу подвергается внешняя часть секторов валков, которые подлежат периодической замене. Экономичной альтернативой замене является наплавка твердым сплавом изнашиваемых поверхностей. Сегментная конструкция изнашиваемых поверхностей позволяет производить многократную наплавку твердым сплавом на протяжении всего срока службы. Кроме того, в процессе работы происходит фреттинг-износ пары «втулка – сектор». Износ втулки подшипника в зоне ее контакта с секторами приводит к увеличению радиальных смещений секторов и росту контактных напряжений в зоне контакта секторов друг с другом в окружном направлении. Значительные контактные напряжения являются причиной разрушения секторов в области их контакта между собой в зоне приливов (рис. 2).

## 2. Моделирование напряжено-деформированного состояния валков мельницы

Оценка НДС мельницы производилась методом конечных элементов (МКЭ) с помощью пакета прикладных программ ANSYS. Расчетная схема мельницы представляет собой втулку подшипника, на которую надеты секторы (рис. 3). В рас-

четной схеме втулка жестко соединена с кольцом. Секторы, закрепленные на втулке с помощью прижимов, опираются на кольцо и своей внутренней поверхностью контактируют со втулкой. Контактные поверхности представлены на рис. 4–6. На рис. 4–6 приняты следующие цифровые обозначения контактных поверхностей: 1 – втулки с прижимом; 2 – втулки, кольца и сектора; 3 – прижима с сектором; 4 – между секторами. Таким образом, конструкция мельницы имеет многокомпонентную систему сопряжения различных деталей, контактные связи между которыми – неголономные.

При расчете использован вариационно-энергетический подход МКЭ. Согласно [7–9], разрешающие уравнения МКЭ получены минимизацией полной энергии системы  $\mathcal{E}$ :

$$\delta \mathcal{E} = \delta U + \delta U_K - \delta A = 0,$$

где  $U$  – потенциальная энергия деформации;  $U_K$  – потенциальная энергия контактной зоны взаимодействия;  $A$  – работа внешних сил.

Приращение потенциальной энергии деформации системы контактирующих тел имеет вид

$$\delta U = \iiint_V \sigma \delta \varepsilon dV,$$

где  $\sigma$  – вектор напряжений;  $\varepsilon$  – вектор деформаций;  $V$  – объем элемента.

Контактная зона разделена на ряд контактных элементов. Контактный элемент описывает взаимодействие между поверхностным узлом одного тела с соответствующей поверхностью элемента другого тела. Приращение потенциальной энергии контактной зоны взаимодействия площадью  $S$  равно:

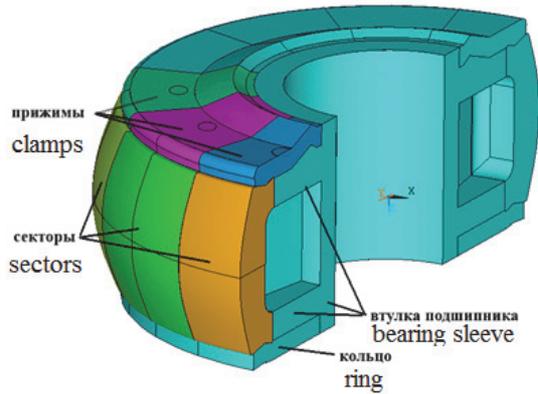
$$\delta U_K = \iint_S P_K \delta u_n dS + \iint_S \tau \delta u_t dS,$$

где  $u_n$  – величина контактного зазора в направлении нормали к поверхности;  $u_t$  – величина контактного зазора в тангенциальном направлении;  $P_k$  – контактное давление в направлении нормали к поверхности ( $P_k = 0$ , если  $u_n > 0$ , или  $P_k = K_n u_n$ , если  $u_n \leq 0$ );  $K_n$  – матрица жесткости контактной поверхности;  $\tau$  – фрикционное напряжение.

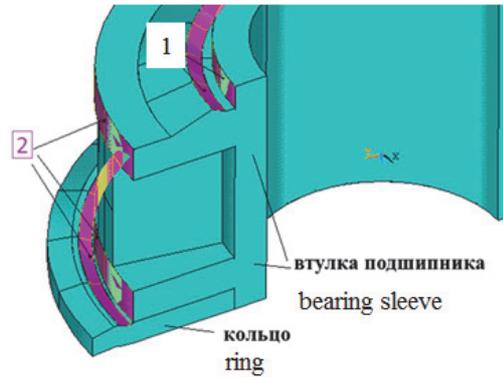
При построении конечно-элементной модели применялись объемные конечные элементы SOLID285. Конечно-элементная модель представлена на рис. 7. При моделировании контакта поверхностей втулки с прижимом, втулки с сек-

тором, прижима с сектором и контакта между секторами использованы контактные элементы CONTA174 и TARGE170. Рабочая нагрузка вклю-

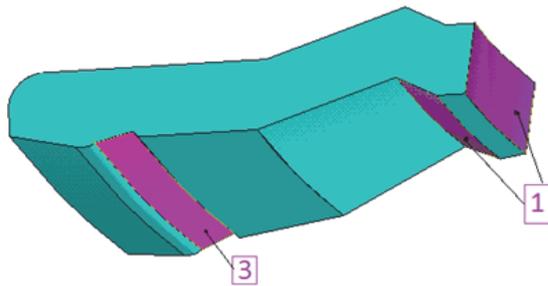
чала силы давления в радиальном  $F_y = 2,6$  МН, в осевом направлении  $F_z = 0,43$  МН и силы затяжки крепежных шпилек прижима  $F_3 = 0,71$  МН.



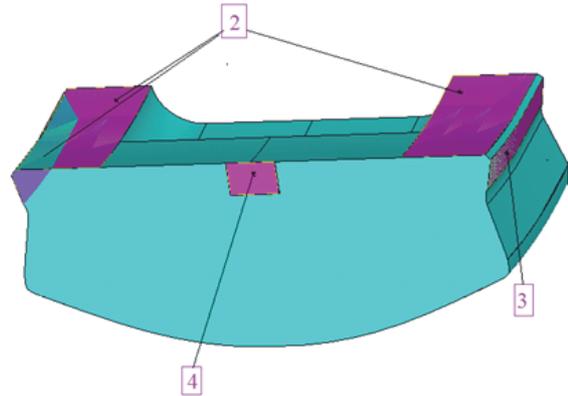
**Рис. 3.** Расчетная схема помольного вала  
[Figure 3. The design scheme of the grinding roll]



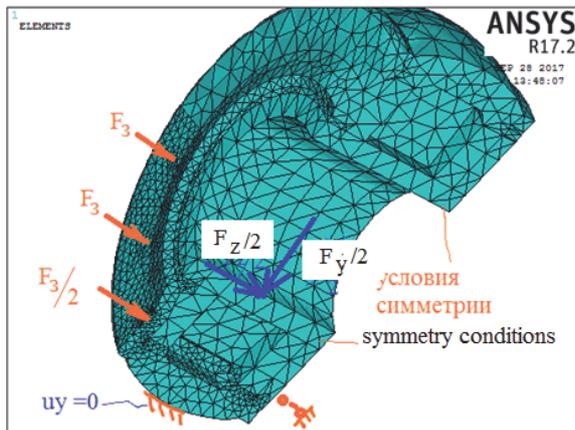
**Рис. 4.** Контактные поверхности втулки подшипника и кольца  
[Figure 4. Contact surfaces of bearing sleeve and ring]



**Рис. 5.** Контактные поверхности прижима  
[Figure 5. Contact surfaces of a clamp]



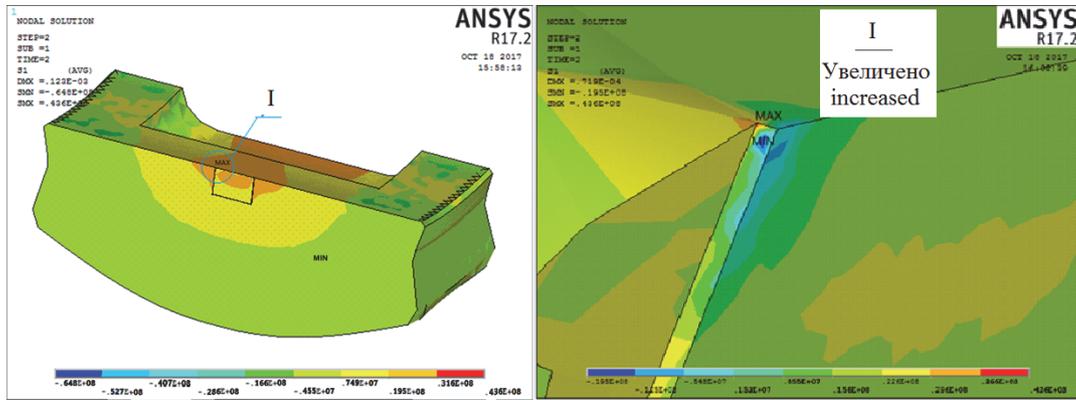
**Рис. 6.** Контактные поверхности сектора (дано изображение половины сектора)  
[Figure 6. The contact surface of the sector (given the image of half the sector)]



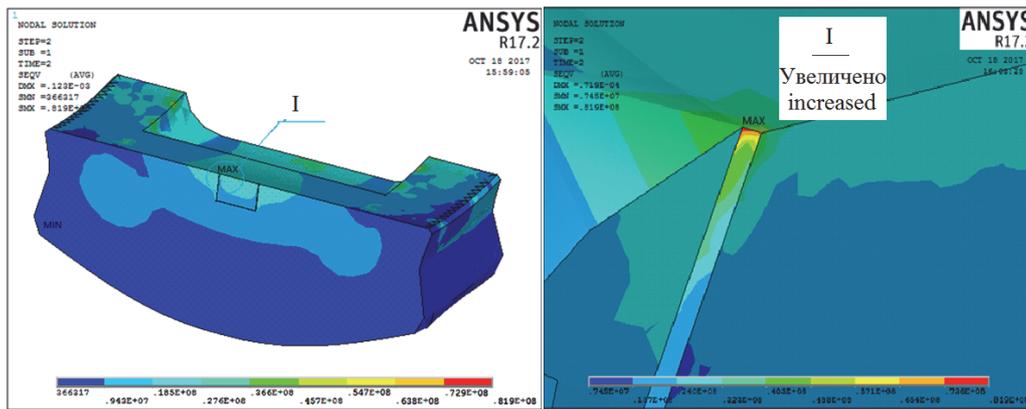
**Рис. 7.** Конечно-элементная модель  
[Figure 7. The finite element model]

Согласно имеющейся технической документации втулка подшипника и сегменты изготовлены из чугуна. Материал втулки подшипника – чугун EN-GJS 400-18U. Наиболее близкий российский аналог высокопрочный чугун с шаровидным графитом ВЧ-40. Материал сегментов – высокопрочный чугун с шаровидным графитом EN-GJN-HV6000 (XCR18), что подтверждается протоколом химического анализа образцов, взятых из разрушенных сегментов (рис. 3). Наиболее близкий российский аналог – хромистый чугун типа ЧХ16М2.

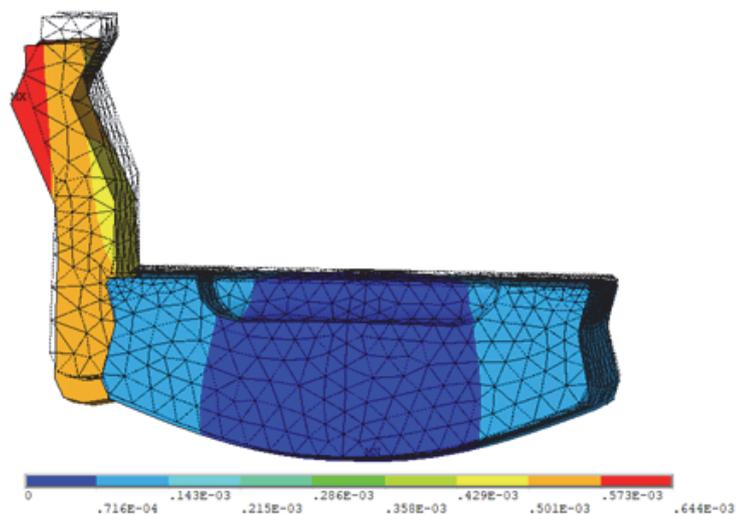
В качестве характеристики, определяющей уровень напряженного состояния материала, принято эквивалентное напряжение по Мизесу.



**Рис. 8.** Первое главное напряжение, Па  
**[Figure 8.** The first main stress, Pa]



**Рис. 9.** Эквивалентные напряжения, Па  
**[Figure 9.** Equivalent stresses, Pa]



**Рис. 10.** Перемещения сектора и прижима в радиальном направлении, м  
**[Figure 10.** Sector and clamp movements in the radial direction, m]

### 3. Результаты моделирования

Основные результаты расчета НДС представлены на рис. 8, 9. Расчет показал, что значения напряжений невысоки. Максимальные значения растягивающих напряжений достигают 43 МПа, а эквивалентные – 82 МПа в контактной зоне взаимодействия секторов. Вычисленные перемещения сектора и прижима показаны на рис. 10. Недеформированное состояние показано черным контуром. Смещение прижима составили 0,4–0,64 мм, максимальное смещение сектора 0,14 мм.

### 4. Исследование влияния износа втулки на разрушение сегмента

По мере износа контактирующих поверхностей сегменты конструкции мельницы смещаются и садятся на уменьшенный изношенный посадочный диаметр втулки подшипника. В конструкции мельницы предусмотрены зазоры между секторами, которые, как правило, составляют от 1 до 4 мм. При уменьшении посадочного радиуса имеющиеся зазоры постепенно выбираются. После того как зазоры оказываются выбранными, секторы начинают распирает друг друга в зонах приливов. При этом контактные напряжения в зоне приливов возрастают. При работе мельницы условие самоторможения в резьбе крепежных шпилек прижима нарушается и происходит

самоотвинчивание [10]. В случае неравномерности этого процесса износ контактирующих поверхностей сегментов и втулки также происходит неравномерно. Поэтому секторы могут смещаться относительно друг друга в радиальном направлении (перемещение  $\Delta$  на рис. 11). При относительном смещении секторов на величину  $\Delta = 0,5$  мм главные растягивающие напряжения достигают 64 МПа (рис. 12), а эквивалентные напряжения в зоне растяжения – 90 МПа (рис. 13).

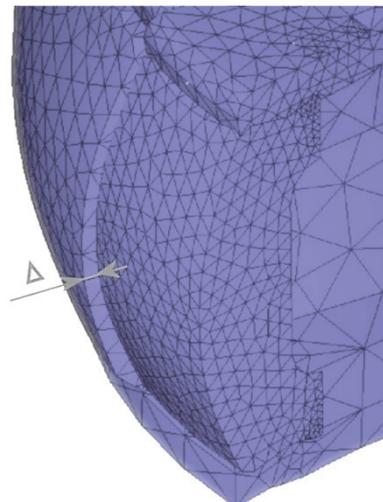


Рис. 11. Смещение  $\Delta$  одного сектора относительно другого  
[Figure 11. The displacement  $\Delta$  of one sector relative to another]

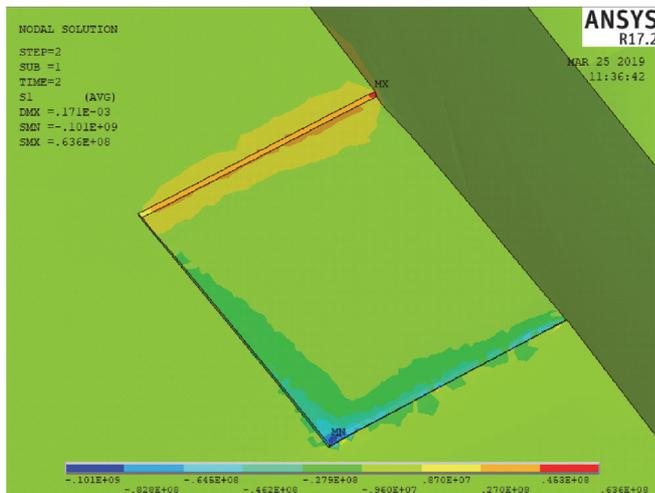


Рис. 12. Первые главные напряжения с учетом относительного смещения секторов, Па  
[Figure 12. The first principal stresses, taking into account the relative displacement of the sectors, Pa]

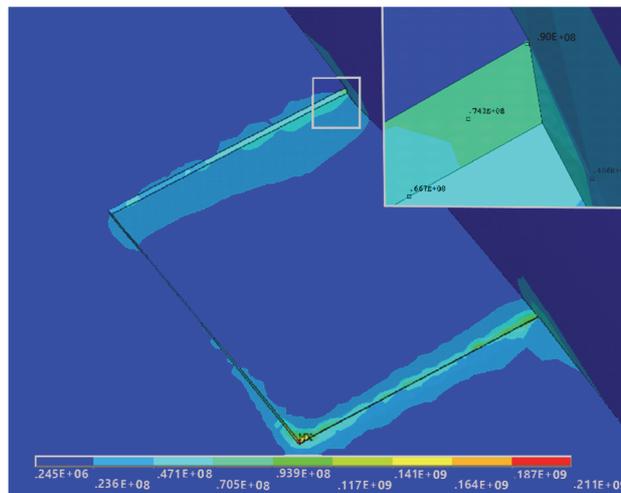


Рис. 13. Эквивалентные напряжения с учетом относительного смещения секторов, Па  
[Figure 13. Equivalent stresses, taking into account the relative displacement of sectors, Pa]

При упругом деформировании конструкции эквивалентные напряжения, возникающие в результате действия рабочей нагрузки 82 МПа, сумми-

руются с напряжениями от смещения. При одновременном воздействии рабочей нагрузки и смещения  $\Delta = 0,5$  мм суммарные эквивалентные на-

пряжения составляют 172 МПа. Предел выносливости материала валков, равный 200–210 МПа, с учетом понижающих факторов уменьшается практически в два раза и становится равным 100–105 МПа [11–14]. Таким образом, ресурс работы конструкции мельницы становится ограниченным, и создаются условия для развития усталостных трещин в контактной зоне приливов секторов, что и наблюдалось при обследовании мельницы.

Для определения допустимых параметров трещиноподобных дефектов можно использовать методику, предложенную в [15], разработанную для базовых деталей кузнечно-прессовых машин.

### Заключение

Проведенное исследование выявило причины разрушения деталей валковой мельницы: при одновременном воздействии рабочей нагрузки и смещения секторов, возникающего из-за интенсивного износа, суммарные эквивалентные напряжения превышают значение предела выносливости при циклическом нагружении. Следовательно, происходит накопление усталостной повреждаемости материала, формирование и рост трещин, что отрицательно сказывается на работоспособности мельницы.

Для предотвращения разрушения сегментов и продления срока их службы необходимы следующие мероприятия:

- область контакта между секторами сформировать в виде приливов плавной формы, не имеющих концентраторов напряжений;
- обеспечить своевременную наплавку твердым сплавом изнашиваемой поверхности втулки подшипника в зоне ее контакта с сегментами;
- стабилизировать в процессе эксплуатации силу затяжки крепежных шпилек прижима;
- для уменьшения трения и износа целесообразно использовать антифреттинговые покрытия и смазки.

### Список литературы / References

1. Brozek M, Naziemiec Z. Analysis of the mechanics of the comminution process of minerals in crushers and high-pressure grinding rolls. *Gospodarka surowcami mineralnymi [Mineral resources management]*. 2012;28(3):139–153.
2. Simmons M, Gorby L, Terembula J. Operational experience from the United States' first vertical roller mill

for cement grinding. *2005 IEEE. Cement Industry Technical Conference. Conference Record*. 2005. p. 241–249.

3. Altun D, Aydoğan N, Altun O, Benzer A. Performance Evaluation of Vertical Roller Mill in Cement Grinding: Case Study ESCH Cement Plant. *European symposium on comminution classification. Conference Paper 15*. 2017. p. 1–7.

4. Engeln I. Polysius roller mills for cement grinding – operating results from a Mexican cement works. *35<sup>th</sup> Krupp Polysius Cement Day. Conference Paper. ZKG International*. 2001;54(10):550–554.

5. Saito J, Hosono M, Shibuya K, Okano Y. Roller Mill as a Control Object. *IFAC Proceedings*. 1983;16(15):91–99.

6. Jung O. Wear protection in vertical roller mills. *ZKG International*. 2000;31(9):252–261.

7. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike [Finite element method in engineering]*. Moscow: Mir Publ.; 1975. (In Russ.)

Zenkevich O. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 540 с.

8. Zavarise G, Wriggers P, Schrefler B. A method for solving contact problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1998;42(3):473–498.

9. Kuss F, Lebon F. Stress based finite element methods for solving contact problems: comparisons between various solution methods. *Advances in Engineering Software*. 2009;40(8):697–706.

10. Birger IA, Iosilevich GB. *Rez'bovye flantsyevye soedineniya [Threaded flange connections]*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1990. (In Russ.)

Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые фланцевые соединения. М.: Машиностроение, 1990. 365 с.

11. Terentyev VF, Korableva SA. *Ustalost' metallov [Fatigue of metals]*. Moscow: Nauka Publ.; 2015. (In Russ.)

Терентьев В.Ф., Коралева С.А. Усталость металлов. М.: Наука, 2015. 484 с.

12. Birger I.A. *Prochnost' i nadezhnost' mashinostroitel'nykh konstruksii [Strength and reliability of engineering structures]*. Ufa: USATU Publ.; 1998. (In Russ.)

Биргер И.А. Прочность и надежность машиностроительных конструкций. Уфа: УГАТУ, 1998. 349 с.

13. Liao D, Peng Zhu S, Correia J, De Jesus A, Bertho F. Recent advances on notch effects in metal fatigue: A review. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2020;43(4):637–659.

14. Kornilova AV, Idarmachev IM, Kyaw Zaya, Thtet Paing. *Prakticheskie aspekty otsenki povrezhdaemost' v usloviyakh mnogotsiklovoi ustalosti [Practical aspects of assessing damage under conditions of multi-cycle fatigue]*. Moscow: Pero Publ.; 2020. (In Russ.)

Корнилова А.В., Идармачев И.М., Чжо Зяяр, Тем Паинг. Практические аспекты оценки повреждаемость в условиях многоциклового усталости. М.: Перо, 2020. 115 с.

15. Kornilova AV, Kyaw Zaya. Definition of acceptable parameters of defects in basic details of forging and press machines. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(4):308–315. (In Russ.)

Корнилова А.В., Чжо Зяяр. Определение допустимых параметров дефектов в базовых деталях кузнечно-прессовых машин // Вестник Российского универси-

тета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 4. С. 308–315.

#### Для цитирования

Калягина Н.В., Карпукхин И.И., Корнилова А.В., Сильверстов И.Н. Работоспособность валковой тарельчатой мельницы для помола цемента // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 181–188. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-3-181-188>

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-3-181-188

Research article

## Capacity of roller mill for cement grinding

Nadezhda V. Kalyagina<sup>a</sup>, Ivan I. Karpukhin<sup>b</sup>, Anna V. Kornilova<sup>c</sup>, Igor N. Silverstov<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology),  
5 2-ya Baumanskaya, bldg 1, Moscow, 105005, Russian Federation

<sup>b</sup>ZAO «Prochnost», 8a Ryazanskii Ave, Moscow, 109428, Russian Federation

<sup>c</sup>Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

#### Article history:

Received: June 9, 2020

Revised: June 9, 2020

Accepted: July 9, 2020

#### Keywords:

roller mill, disk rolls, stress-strain state, contact stresses, friction, wear

*Abstract.* Engineering for the cement industry is part of the heavy industry. The cement industry is the main supplier of raw materials for the production of concrete and reinforced concrete. For grinding cement, two types of mills are used – ball and roller. Recent decades have proven the great effectiveness of a vertical roller mill for grinding raw materials. Its effectiveness, combined with the implementation of drying, grinding and separation in one unit, gives it an undeniable advantage over a ball mill. This explains the significant increase in the share of roller mills in the cement mill market. The grinding process in such mills occurs due to abrasion, respectively, in the process of work wear of the rubbing parts of the mill occurs. The work evaluated the performance of a mill with smooth disk rolls. During the study, the cause of the destruction of the sectors of the mill produced by FLSmidth, operating in the Russian Federation, was identified. The study revealed the causes of the destruction of the details of the roller mill: with the simultaneous impact of the workload and the displacement of the sectors resulting from intensive wear, the total equivalent stresses exceed the value of the endurance limit under cyclic loading. Therefore, the accumulation of fatigue damage to the material, the formation and growth of cracks, which adversely affects the performance of the mill. A number of measures have been proposed to increase the operability of mills of this design.

#### For citation

Kalyagina NV, Karpukhin II, Kornilova AV, Silverstov IN. Capacity of roller mill for cement grinding. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(3):181–188. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-3-181-188>

*Nadezhda V. Kalyagina*, Associate Professor of Department of Applied Mechanics of Faculty of Robotics and Complex Automation of BMSTU; Candidate of Physico-Mathematical Sciences, PhD; eLIBRARY Author ID: 633555, Scopus Author ID: 57164817100.

*Ivan I. Karpukhin*, CEO.

*Anna V. Kornilova*, Professor of the Construction Department of the Academy of Engineering of RUDN University; Doctor of Technical Sciences; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5569-9320>, eLIBRARY SPIN-code: 6569-6240, Author ID: 351426, Web of Science ResearcherID: U-3353-2017, Scopus Author ID: 7004499009; [kornilova-av@rudn.ru](mailto:kornilova-av@rudn.ru)

*Igor N. Silverstov*, chief engineer; Candidate of Technical Sciences.



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-3-189-196

УДК 656.7.052:351.814.335.1

Научная статья

## Построение маршрутов в дополненной реальности с использованием ГИС-технологий

А.В. Юдин, А.Н. Стратиеенко, М.М. Мадумаров, М.А. Мирненко

Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

### История статьи:

Поступила в редакцию: 22 апреля 2020 г.

Доработана: 23 июня 2020 г.

Принята к публикации: 24 июля 2020 г.

### Ключевые слова:

маршрутизация, дополненная реальность, геоинформационные сервисы

*Аннотация.* В настоящее время одним из перспективных направлений разработки в сфере информационных технологий является дополненная реальность. С ее помощью можно получить доступ к данным реального мира посредством камеры устройства, используя интерактивный подход отображения данных. Дополненная реальность широко применяется в различных областях жизни: начиная от игровых и заканчивая профессиональными приложениями для проведения инструктажа, обучения персонала в производственном секторе, тяжелом машиностроении и высокотехнологическом секторе, тем самым обеспечивая возможность использовать виртуальные инструкции для осуществления квалифицированных операций. Еще одним способом применения дополненной реальности является геолокация – возможность в режиме реального времени отслеживать позицию объектов на геоинформационной карте. В статье рассматриваются способы построения маршрутов в дополненной реальности на основе геолокационных данных, анализируются особенности ее применения и выявленные проблемы. Приводится пример построения маршрута на карте с привязкой к геолокационным данным и на сцене дополненной реальности с вычисленными координатами точек маршрута. Представлены способы преобразования географических координат в координаты сцены дополненной реальности.

## Введение

Основной целью статьи является рассмотрение возможности применения технологии дополненной реальности в геоинформационных

системах для отображения и построения маршрутов. Разберем возможности применения в области маршрутизации, а также выделим существующие проблемы.

Для построения виртуальных маршрутов используем представленный Apple в 2017 г. фреймворк ARKit [1], а для создания приложений дополненной реальности под операционную систему iOS и определения геолокации – фреймворк CoreLocation, встроенный в SDK iOS [2]. Также применим открытый SDK и API сервиса геолокации HereMaps для предоставления картографической подложки, отображения маршрутов и результатов расчета.

*Юдин Александр Викторович*, доцент департамента механики и мехатроники Института космических технологий Инженерной академии РУДН; кандидат физико-математических наук; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6802-8603>, eLIBRARY SPIN-код: 4917-0840; yudin-av@rudn.ru

*Стратиеенко Артем Николаевич*, магистр департамента механики и мехатроники Института космических технологий Инженерной академии РУДН; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3350-813X>.

*Мадумаров Мухриддин Мухаммаджон угли*, магистр департамента механики и мехатроники Института космических технологий Инженерной академии РУДН; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0904-5411>.

*Мирненко Маргарита Александровна*, магистр департамента механики и мехатроники Института космических технологий Инженерной академии РУДН; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3922-2308>.

© Юдин А.В., Стратиеенко А.Н., Мадумаров М.М., Мирненко М.А., 2020

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

International License

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



## 1. Создание сцены дополненной реальности

При создании сцены дополненной реальности камера устройства использует реальный мир для создания виртуальных объектов. Это происходит за счет того, что виртуальные объекты, такие как 3D-модели, видео, текстуры или звуковые эффекты, проецируются перед нами на камеру устройства, поверх реального мира.

Для создания дополненной реальности привлекается ряд аппаратных технических устройств,

таких как процессор, дисплей, датчики и устройства ввода/вывода. Всеми этими сенсорами обладают современные мобильные устройства. В составе обработки информации с мобильного устройства iPhone использует встроенный в iOS фреймворк ARKit. В свою очередь ARKit обрабатывает информацию с различных сенсоров устройства [3]. Сенсоры представлены в табл. 1.

Сцена дополненной реальности использует систему визуально-инерциальной одометрии.

Таблица 1

Состав сенсоров мобильного устройства  
[Table 1. Data capture by the device]

Устройство [Device]	Сенсор 1 [Sensor 1]	Сенсор 2 [Sensor 2]	Сенсор 3 [Sensor 3]	Сенсор 4 [Sensor 4]	Сенсор 5 [Sensor 5]	Сенсор 6 [Sensor 6]
iPhone	Камера [Camera]	Барометр [Barometr]	Гироскоп [Gyroscope]	Акселерометр [Accelerometr]	Магнитометр [Magnetometr]	GPS

*Визуальная одометрия* – метод оценки положения и ориентации устройства с помощью анализа последовательности изображений, снятых установленной на нем камерой [4].

*Визуально-инерциальная одометрия* – технология, использующая видеокамеры в дополнение к инерциальным датчикам и способная обеспечить полное шестистороннее отслеживание свободного движения в визуально различимых средах [5].

*Фреймворк ARKit* анализирует камеру телефона и данные о движении для отслеживания окружающего мира. Компьютерное зрение регистрирует заметные особенности в среде и способно поддерживать осведомленность об их расположении в реальном мире вне зависимости от движения устройства iPhone. Система объединяет данные с визуальной и инерциальной подсистемой устройства для определения положения и смещения на сцене [6].

К визуальной подсистеме относятся такие устройства, как камера, а к инерциальной подсистеме – акселерометр, магнитометр и гироскоп [6].

*Магнитометры* используют информацию с установленных на мобильном устройстве датчиков для измерения напряженности поля [7]. При этом магнитометр мобильного устройства измеряет напряженность поля. Магнитометр позволяет оценить воздействие на устройство магнитного полюса Земли [8].

В основе выборки лучшего позиционирования на сцене лежит *фильтр* Калмана [9] – алгоритм, который в каждый момент времени после инициализации сцены выбирает наилучшее из показаний двух подсистем, что позволяет корректно определить на сцене текущую позицию и ориентацию пользователя [10].

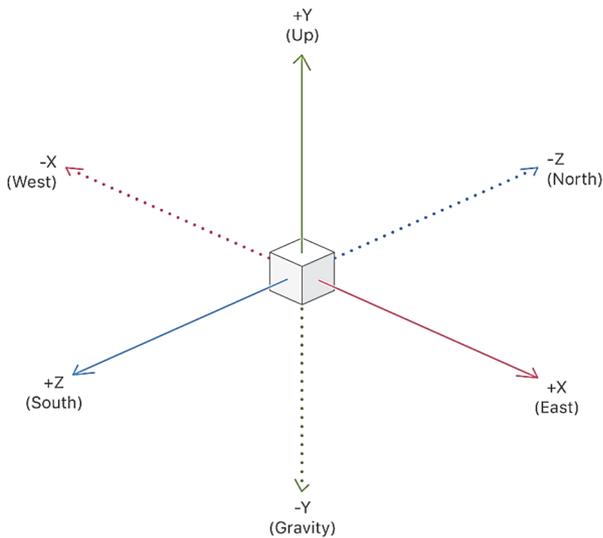
При создании сцены дополненной реальности есть возможность определения горизонтальных и вертикальных поверхностей, что позволяет рассчитать расстояние от точки инициализации сцены до поверхности Земли для определения высоты при построении маршрутов [9].

Помимо перечисленных устройств и датчиков, ARKit использует показания с приемника глобальной системы позиционирования (GPS), что позволяет определить географические координаты текущего положения пользователя. Данные получает от спутников GNSS.

## 2. Сопоставление системы координат сцены дополненной реальности и осей географической системы координат

Оси  $X$  и  $Z$  совпадают с направлениями долготы и широты [11], что позволяет установить выравнивание осей дополненной реальности ARKit рис. 1:

- направить ось  $Y$  параллельно силе тяжести;
- ось  $Z$  расположить по направлению к востоку;
- ось  $X$  установить по направлению курса компаса.

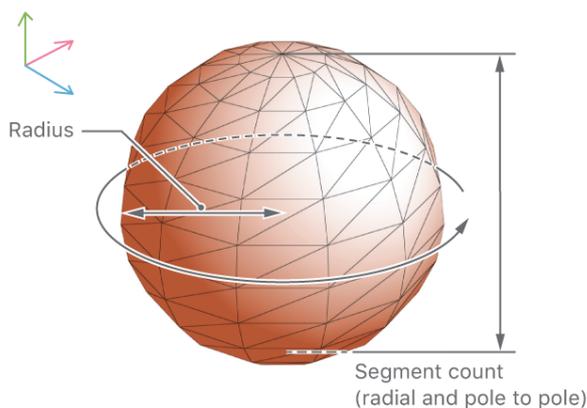


**Рис. 1.** Система координат сцены дополненной реальности [Figure 1. System coordinate for AR Scene]

Начало координат размещается в исходном месте устройства в момент инициализации сцены в точке ( $X = 0; Y = 0; Z = 0$ ).

### 3. Расположение маршрутов на карте и сцене дополненной реальности

Для определения позиции объекта на сцене необходимо произвести ряд манипуляций с декартовой и географической системами координат (рис. 3). Декартовая система координат используется для размещения объектов на сцене дополненной реальности [12]. Географическая – для отображения объектов на географической карте. Связь систем представлена на рис. 2.

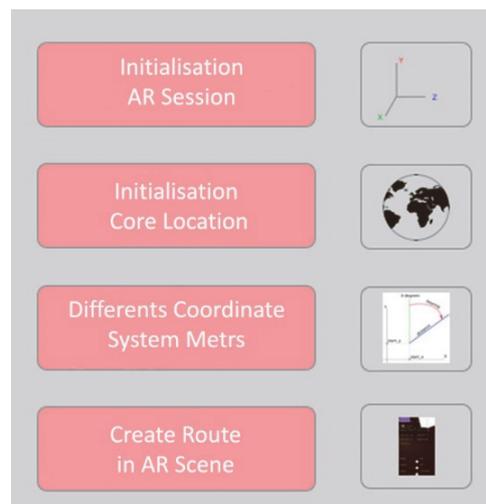


**Рис. 2.** Системы координат сцены дополненной реальности и карты [Figure 2. System coordinates for AR scene and maps]

Координаты на сцене дополненной реальности измеряются в метрах [11]. За счет этого возможно произвести преобразование координат из географической системы в декартову [13]. При этом смещение между начальной точкой и конечной – искомой на сцене дополненной реальности – и будет смещением между географическими координатами, преобразованными в метры. Поскольку координаты определяются как долгота и широта, смещение между этими параметрами и есть смещение по осям  $X$  и  $Z$  сцены дополненной реальности соответственно.



**Рис. 3.** Алгоритм построения маршрута в дополненной реальности



**Figure 3.** Algorithm build route at AR

После того как будет произведен расчет смещения координат в одной системе и преобразован в другую, необходимо определить центр начала системы координат сцены дополненной реальности. Для этого необходимо выбрать такую точку, в которой в момент инициализации сцены будут известны координаты, полученные с помощью GPS [4]. В момент, когда будет зафиксирована такая точка, появится возможность построения на сцене дополненной реальности точек маршрута, зная только их географические координаты (рис. 4).

Формула для определения расстояния между координатами на карте (1):

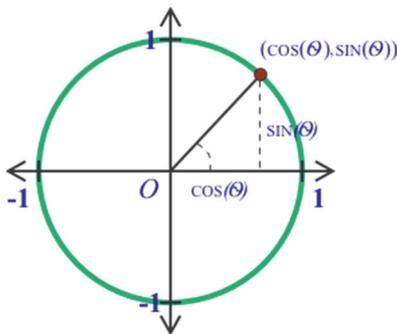
$$\cos(d) = \sin(\vartheta a) * \sin(\vartheta b) + \cos(\vartheta a) * \cos(\vartheta b) * \cos(\vartheta a - \vartheta b), \quad (1)$$

где  $\vartheta a$  и  $\vartheta b$  – широты;  $\vartheta a, \vartheta b$  – долготы данных пунктов;  $d$  – расстояние между пунктами, измеряемое в радианах длиной дуги большого круга земного шара.

Перевод радиан в метры:

$$D = \text{acos}(d) * R, \quad (2)$$

где  $d$  – расстояние между пунктами, измеряемое в радианах длиной дуги большого круга земного шара;  $R = 6371$  км – средний радиус земного шара.



**Рис. 4.** Алгоритм построения маршрута в дополненной реальности  
**[Figure 4.** Algorithm build route at AR]

Формула для определения смещения в метрах между долготами и широтами и преобразование в координаты сцены дополненной реальности (2):

$$\text{deltaLat} = \frac{2 * \text{Pi} * R}{360}, \quad (3)$$

где  $\text{Pi} \sim 3,141592$  – математическая константа, выражающая отношение окружности к длине ее диаметра;  $R = 6371$  км – средний радиус земного шара [14].

$$\text{deltaLon} = \frac{2 * \text{Pi} * R * \cos(\text{lat1})}{360}, \quad (4)$$

где  $\text{Pi} \sim 3,141592$  – математическая константа, выражающая отношение окружности к длине ее диаметра;  $R = 6371$  км – средний радиус земного шара;  $\text{lat1}$  – широта начальной координаты на карте.

$$\text{deltaX} = (\text{lon2} - \text{lon1}) * \text{deltaLon}, \quad (5)$$

где  $\text{lon1}$  и  $\text{lon2}$  – долгота начальной и конечной координаты на карте;  $\text{deltaLon}$  – приращение по долготе.

$$\text{deltaZ} = (\text{lat2} - \text{lat1}) * \text{deltaLat}, \quad (6)$$

где  $\text{lat1}$  и  $\text{lat2}$  – широта начальной и конечной координаты на карте;  $\text{deltaLat}$  – приращение по широте.

Вычисленные значения  $\text{deltaX}$  и  $\text{deltaZ}$  являются приращением для осей  $X$  и  $Z$  соответственно.

$$\text{objX} = X0 + \text{deltaX},$$

$$\text{objZ} = Z0 + (-\text{deltaZ}), \quad (7)$$

где  $\text{objX}$  и  $\text{objZ}$  – координаты точки на сцене дополненной реальности [15].

Результаты расчетов для тестового маршрута представлены в табл. 2.

#### 4. Проведение эксперимента. Построение маршрута

На карте задаем точками сегменты маршрута для создания их в режиме дополненной реальности (рис. 5).

Инициализируем сцену дополненной реальности в начале маршрута в точке.

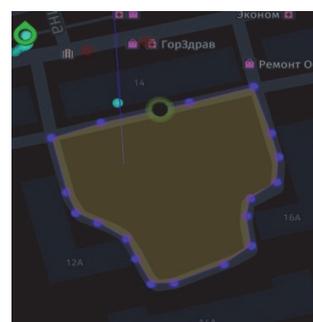
На рис. 6 и 7 представлены результаты построения маршрута, а также результаты отслеживания геопозиции пользователя на маршруте для анализа качества полученных точек по GPS.

Вычисленные координаты сцены дополненной реальности  
 [Table 2. Computed coordinate for AR scene]

Широта [Latitude]	Долгота [Longitude]	Смещение по долготе [Offset latitude]	Смещение по широте [Offset longitude]	Расстояние [Distance]
55.790607665738925	38.43919700016806	–	–	0
55.790637186838694	38.43939233127532	12.224978492197607	3.2862737939613993	12.658748279907163
55.79070514309321	38.439813942917496	38.61193410739788	10.851129443203357	40.10780048416137
55.79050494307579	38.43993051296731	45.907578778373896	–11.435034553283009	47.31031547968738
55.79040408403042	38.43997846910398	48.908958064845315	–22.6626121255378	53.90445211015675
55.79029708193492	38.4399654496344	48.09412248750543	–34.574030910073326	59.2319189983349
55.79022642140064	38.439792761745274	37.28629080109022	–42.439925605768074	56.49272652482635
55.790151503070554	38.4397685710474	35.7722935410897	–50.77979596196146	62.114933931060584
55.7900245268851	38.43979900978218	37.67732998495587	–64.9147202697816	75.05679065086598
55.789945304497145	38.439617293316154	26.304436440575017	–73.73371615612359	78.28536143824138
55.789865714112274	38.439289565788734	5.793305212529633	–82.59367727202104	82.79660465819886
55.78986205414613	38.43913933484901	–3.6090374696573067	–83.00110283983018	83.0795568601002
55.789969241354044	38.43904044576228	–9.798102669302764	–71.06907743500359	71.74139931035073
55.79005458812978	38.43897875048687	–13.659358695325283	–61.56831781946964	63.065343396300435
55.790123547746596	38.43878813629289	–25.589124795047287	–53.891768389920344	59.6584529781236
55.79016529680853	38.438644316951255	–34.59019166508795	–49.24428407415834	60.178852226622965
55.790252657035644	38.43858245811466	–38.46168431939108	–39.51938807638185	55.14610910749036
55.790486478018444	38.438482522236406	–44.71626393736429	–13.490555334339737	46.70704742272045
55.7905507838302	38.438809039411126	–24.280883755482574	–6.332065114763968	25.093154898600957

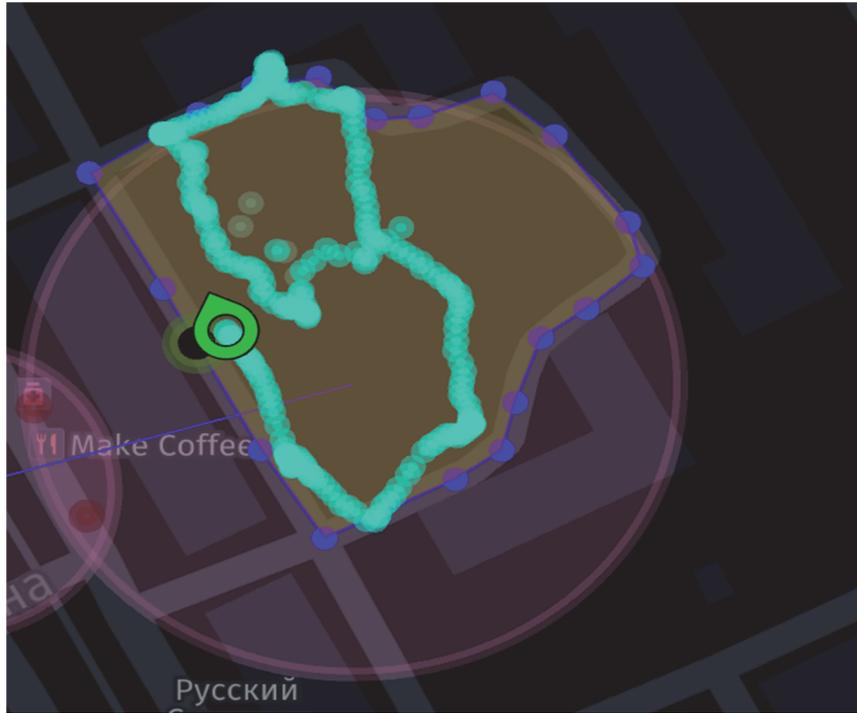


а

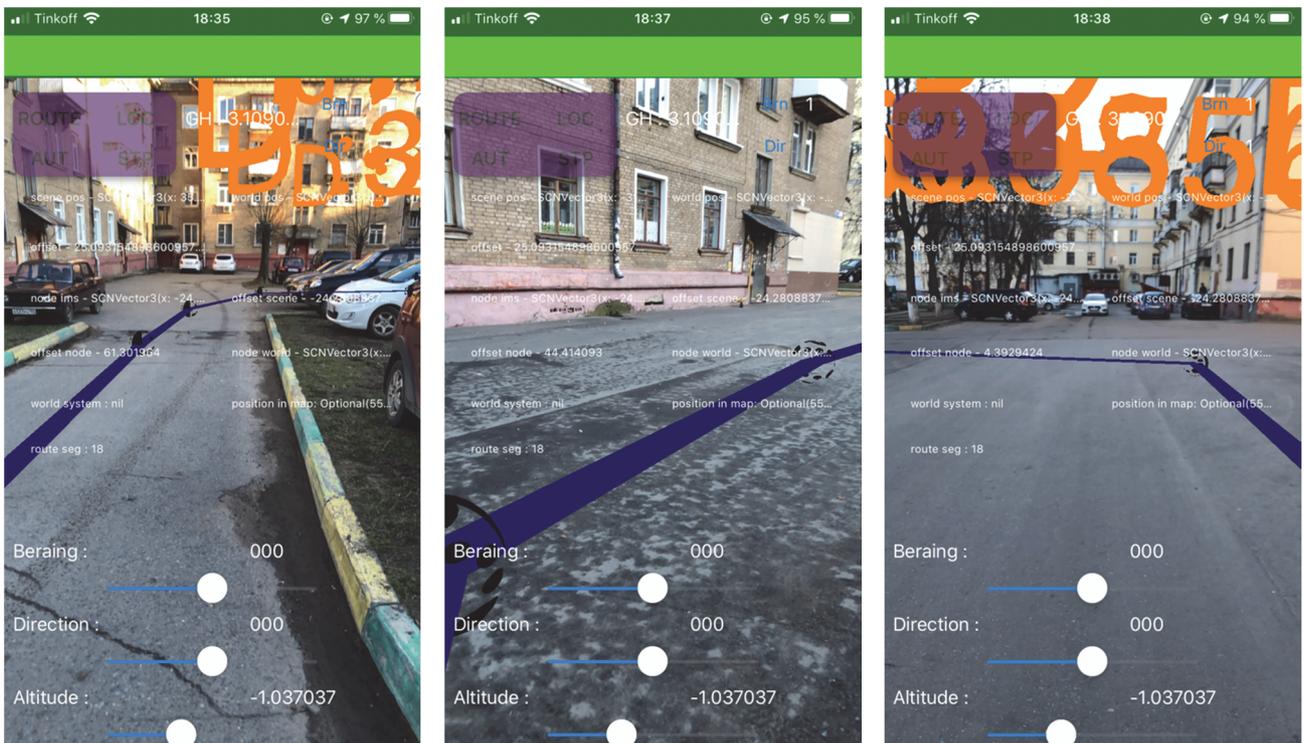


б

Рис. 5. Построение маршрута на карте (а) и отображение точек маршрута на мобильном устройстве (б)  
 [Figure 5. Route in maps (a) and mobile client (б)]



**Рис. 6.** Движение по маршруту, отслеживание геопозиции  
[Figure 6. Move at route, location service]



**Рис. 7.** Маршрут в дополненной реальности  
[Figure 7. Route an augmented reality]

## Заключение

Маршрутизация широко используется как для пешеходных маршрутов, так и для автомобильных. Не всегда используя карту можно понять в каком направлении необходимо двигаться. За счет использования дополненной реальности, построенной на геолокационном сервисе, пользователю сразу можно будет начать движение по нужному маршруту

Анализ и эксперимент, проведенные при построении маршрутов в дополненной реальности, показали слабые места такого подхода, а именно: определение геопозиции пользователя в момент инициализации сцены и во время движения. Происходит частое отклонение, в результате чего вычисленные смещения прибавляются к неправильным координатам с ошибкой. С целью устранения данной проблемы предлагается рассмотреть возможность корреляции данных с последующей калибровкой сцены.

## Список литературы / References

1. Furht B. *Handbook of Augmented Reality*. Florida Atlantic University (USA). Springer; 2011.
2. Francese R, Gravino C, Michele R, Scanniello G, Tortora G. Mobile app development and management: results from a qualitative investigation. *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Mobile Software Engineering and Systems*. IEEE Press; 2017. p. 133–143.
3. Schöps T, Engel J, Cremers D. Semi-dense visual odometry for AR on a smart-phone. *Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. 2014;(1):145–150.
4. Lin T, Maire M, Belongie SJ, Hays J, Perona P, Ramanan D, Dollár P, Zitnick CL. Microsoft COCO: common objects in context. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*. Zurich, Switzerland; 2014. p. 740–755.
5. Mur-Artal R, Tardós JD. ORB-SLAM2: an open-source SLAM system for monocular, stereo and RGB-D cameras. *IEEE Transactions on Robotics*. 2017;33(5):1255–1262.
6. Kulikov AS, Mavlutov AR, Mavlutov AR. Application of augmented reality in GIS. *Herald of Science and Education*. 2019;2(56)(2):25–28.
- Куликов А.С., Мавлютов А.Р., Мавлютов А.Р. Применение дополненной реальности в ГИС // Вестник науки и образования. 2019. № 2 (56). Ч. 2. С. 25–28.

7. Lee DH, Lee JM, Han JK, Choi BI. MR elastography of healthy liver parenchyma: normal value and reliability of the liver stiffness value measurement. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2013;38(5):1215–1223.

8. Venkatesh SK, Wang G, Teo LL, Ang BW. Magnetic resonance elastography of liver in healthy Asians: normal liver stiffness quantification and reproducibility assessment. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2014; 39(1):1–8.

9. Mourikis AI, Roumeliotis SI. A multi-state constraint Kalman filter for vision-aided inertial navigation. *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Rome, Italy; 2007. p. 3565–3572.

10. Kim LM, Mourikis BH. Real-time motion tracking on a cellphone using inertial sensing and a rolling-shutter camera. *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2013;(1): 4712–4719.

11. Yurlov DN. Princip dopolnennoy realnosti v navigatsii [Augmented reality principle in navigation]. *Academy*. 2019;1(40):26–28.

Юрлов Д.Н. Принцип дополненной реальности в навигации // Academy. 2019. № 1 (40). С. 26–28.

12. Faure F, Gilles B, Bousquet G, Pai DK. Sparse meshless models of complex deformable solids. *ACM transactions on graphics (TOG)*. 2011;30(4):73.

13. Baraff D, Witkin A. Large steps in cloth simulation. *Proceedings of the 25<sup>th</sup> annual conference on computer graphics and interactive techniques*. ACM. 1998. p. 43–54.

14. Luntovskyy A. Advanced software-technological approaches for mobile apps development. *14<sup>th</sup> International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TC-SET)*. 2018:113–118. doi: 10.1109/TCSET.2018.8336168.

15. Kim WT. Mobile Application Development Experiences on Apple's iOS and Android OS. *IEEE Potentials*. 2012;31(4):30–34.

## Для цитирования

Юдин А.В., Стратиенко А.Н., Мадумаров М.М., Мирненко М.А. Построение маршрутов в дополненной реальности с использованием ГИС-технологий // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 189–196. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-3-189-196>

## Construction of routes in augmented reality using GIS technologies

Alexandr V. Yudin, Artem N. Stratienco, Mukhriddin M. Madumarov, Margaryta A. Myrnenko

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

---

### Article history:

Received: April 22, 2020

Revised: July 23, 2020

Accepted: July 24, 2020

---

### Keywords:

routing, augmented reality, geo-information services

*Abstract.* At present, one of the promising directions of development in the field of information technologies is augmented reality, which offers access to real-world data through the device's camera using an interactive data display approach. Augmented reality is widely applied in various areas of life: beginning from game applications, finishing with professional applications for briefing, training for personnel in a manufacturing sector, heavy mechanical engineering and the high-tech sector, thereby providing an opportunity to use virtual instructions for implementation of the qualified operations. Also, the main way to apply augmented reality is location service – the possibility to track the position of objects on the geographic information map in real time. The article discusses ways of constructing routes in augmented reality on the field of location service data and explores the peculiarities of application. Problems identified when applying the above method are analyzed. An example of route construction is given on the map with reference to location service data and on the stage of augmented reality with calculated coordinates of route points. Methods of converting geographical coordinates into coordinates of augmented reality scene are presented.

### For citation

Yudin AV, Stratienco AN, Madumarov MM, Myrnenko MA. Construction of routes in augmented reality using GIS technologies. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(3):189–196. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-3-189-196>

---

*Alexander V. Yudin*, Associate Professor of Department of Mechanics and Mechatronics of Institute of Space Technologies of Academy of Engineering of RUDN University; Candidate of Physical and Mathematical Sciences; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6802-8603>, eLIBRARY SPIN-code: 4917-0840; [yudin-av@rudn.ru](mailto:yudin-av@rudn.ru)  
*Artem N. Stratienco*, master student of Department of Mechanics and Mechatronics of Institute of Space Technologies of Academy of Engineering of RUDN University; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3350-813X>.  
*Mukhriddin M. Madumarov*, master student of Department of Mechanics and Mechatronics of Institute of Space Technologies of Academy of Engineering of RUDN University; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0904-5411>.  
*Margaryta A. Myrnenko*, master student of Department of Mechanics and Mechatronics of Institute of Space Technologies of Academy of Engineering of RUDN University; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3922-2308>.



НАУКИ О ЗЕМЛЕ  
EARTH SCIENCE

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-3-197-207

УДК 552.5

Научная статья

**Современное состояние и перспективы развития  
фосфатно-сырьевой базы России**

**А.Ф. Георгиевский, В.М. Бугина**

Российский университет дружбы народов, *Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6*

*История статьи:*

Поступила в редакцию: 9 апреля 2020 г.

Доработана: 25 апреля 2020 г.

Принята к публикации: 16 июля 2020 г.

*Ключевые слова:*

дефицит фосфора, урожайность, минеральные удобрения, экспорт, сырьевая база, фосфоритовые и апатитовые месторождения, фосфогенез, производство фосфатов, типы и запасы руд, фосфориты, фосфаты, апатиты

*Аннотация.* В статье анализируется состояние фосфатной сырьевой базы России и ее роль в экономическом развитии страны, в частности отечественного сельского хозяйства. Выделены проблемы, которые не позволяют создать современное мощное производство фосфатов, способное удовлетворить существующие запросы сельского хозяйства в фосфорных минеральных удобрениях. Анализируются возможные направления развития фосфорной отрасли в регионах на ближайшую и отдаленную перспективы. Цель работы – анализ современного состояния отечественной минерально-сырьевой базы для производства фосфорных минеральных удобрений, острый дефицит которых сдерживает развитие сельского хозяйства страны. Фактической базой для исследований послужили главным образом обработанные материалы специализированных научных статей и публикации в открытом доступе. Кроме того, привлекались данные, собранные авторами в ходе тридцатилетней работы по изучению фосфоритовых месторождений России и зарубежных стран. Изучены труды ведущих российских производителей фосфорной продукции, горнодобывающих компаний, баз данных специализированных федеральных и региональных геологических компаний. Установлено, что для геологических служб страны важнейшей задачей остается выявление месторождений высококачественных фосфатных руд и прежде всего в Сибири и на Дальнем Востоке России. Значительные перспективы по развитию этих регионов открывает Северный морской путь. Запланированные темпы его развития сулят уникальные возможности по экономическому освоению Таймыро-Анабарского региона, где сосредоточены огромные ресурсы апатитоносных карбонатитов Томпторского щелочного массива и Меймеча-Котуйской провинции.

*Георгиевский Алексей Федорович*, доцент департамента недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии РУДН; доктор геолого-минералогических наук; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4835-760X>, eLIBRARY SPIN-код: 1308-9195; [georgievskiy-af@rudn.ru](mailto:georgievskiy-af@rudn.ru)

*Бугина Виктория Михайловна*, доцент департамента недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии РУДН; кандидат геолого-минералогических наук; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6492-6628>, eLIBRARY SPIN-код: 8410-3861.

© Георгиевский А.Ф., Бугина В.М., 2020



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

## Введение

Доля фосфора в земной коре незначительна – всего 0,08 %, но по образному выражению академика А.Е. Ферсмана – это «вещество жизни и мысли». Фосфор участвует в строении клеточной ткани растений и животных. Он входит в структуру их генов, то есть отвечает за воспроизводство организмов и передачу их потомкам наследственной информации. При дефиците фосфора в почвах у растений нарушаются обменные процессы, они плохо усваивают калий и азот и не могут нормально развиваться [1]. Все три элемента жизненно важны для растений. Но для российских условий принципиальное значение имеет Р. По оценке экспертов, с учетом специфики почв России оптимальные условия для развития растений создаются при концентрациях питательных веществ триады N:P:K, близких к соотношению 1:1.5:0.9. Связь фосфора с урожайностью сельскохозяйственных культур демонстрирует рис. 1. Ежегодно, в зависимости от типа почв и выращиваемых на них культур, с каждым урожаем из почв отчуждается от 30 до 60 % фосфора, что ведет к оскудению и падению их плодородия (рис. 2).

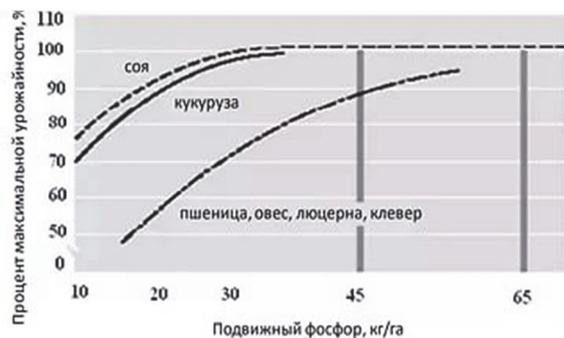


Рис. 1. Взаимосвязь между урожайностью культур и содержанием доступного Р в почве [2]

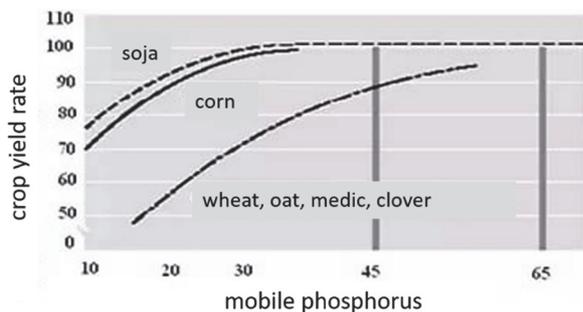


Figure 1. The relationship between crop yields and available P in soil

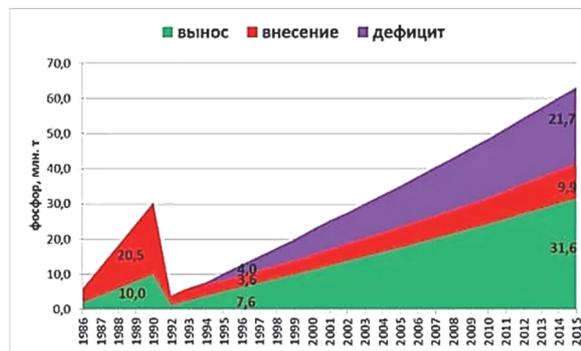


Рис. 2. Соотношение выноса Р и урожайности сельскохозяйственных культур и его внесения с удобрениями

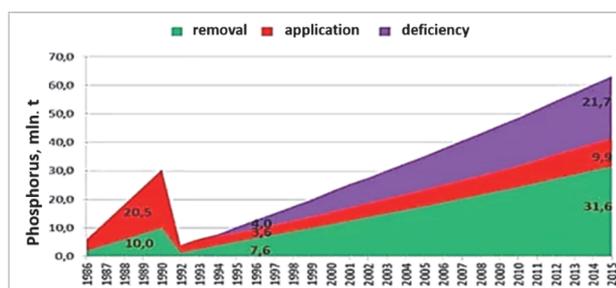


Figure 2. The ratio of the removal P and crop yields and its application with fertilizers

Естественным путем почвы не могут восстановить запасы фосфора. Для его пополнения требуется активное вмешательство человека. Он вносит удобрения в виде природных и искусственных соединений фосфора. В почвах различают минеральный и органический фосфор. Последний включен в сложную структуру органических молекул, которые формируются в ходе различных биогенных процессов. Однако даже в этом случае изначально его природа была минеральной, унаследованной от продуктов выветривания минералов фосфора. Специалистам известно 190 минералов фосфора, но более 95 % его принадлежит апатитовой группе. С генетических позиций апатитовые минералы, без учета метаморфических процессов, подразделяются на магматогенные и осадочные.

Магматогенные апатиты в промышленных масштабах главным образом сосредоточены среди нефелиновых и карбонатитовых комплексов. Осадочные апатиты в форме скрытокристаллических агрегатов образуют фосфориты. Около 85 % природных фосфатов используется для производства фосфорных удобрений. По данным Американской

геологической службы, мировые разведанные запасы фосфатов составляют 70 млрд т  $P_2O_5$  [3]. Запасы P распределены крайне неравномерно, из них 60 % приурочены к Марокко, США и Китаю. Своеобразной фосфатной «Саудовской Аравией» является Марокко – здесь сконцентрировано более 70 % запасов высококачественных фосфоритовых руд. Названные страны являются лидерами по добыче и поставке фосфатов на мировой рынок (рис. 3). Вне конкуренции находится Китай. Ему принадлежит практически половина сырьевого рынка и рынка переработанных фосфатов (рис. 4). Россия по отмеченным показателям занимает четвертое место, ее доля в мировом балансе составляет около 5–6 %.

К крупнейшим производителям фосфатов относятся международные корпорации Марокко, США, Китая, а также российские холдинги «ФосАгро», «Агрохим» и Еврохим (рис. 5).

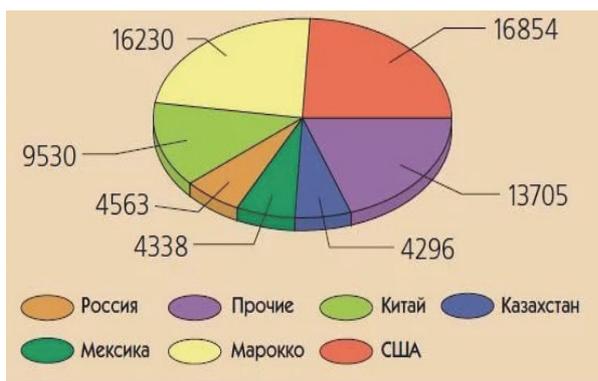


Рис. 3. Распределение запасов фосфоритов по странам, млн т  $P_2O_5$

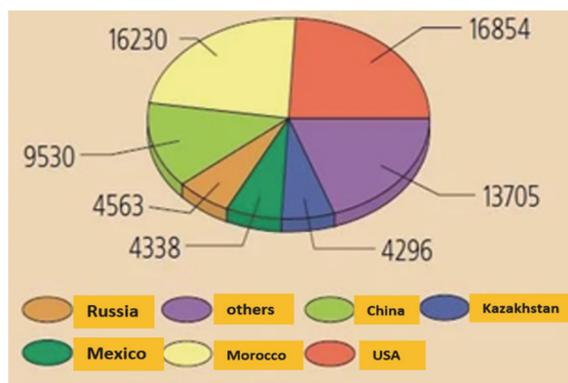


Figure 3. Phosphorites' reserves in different countries, mln tones  $P_2O_5$

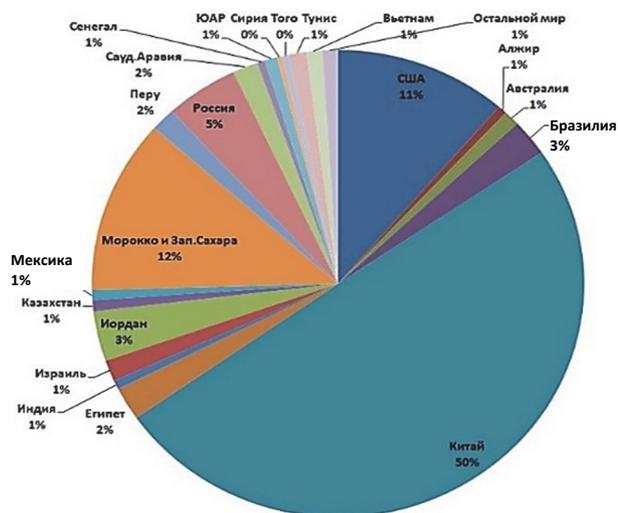


Рис. 4. Доля Китая в мировом фосфатном рынке

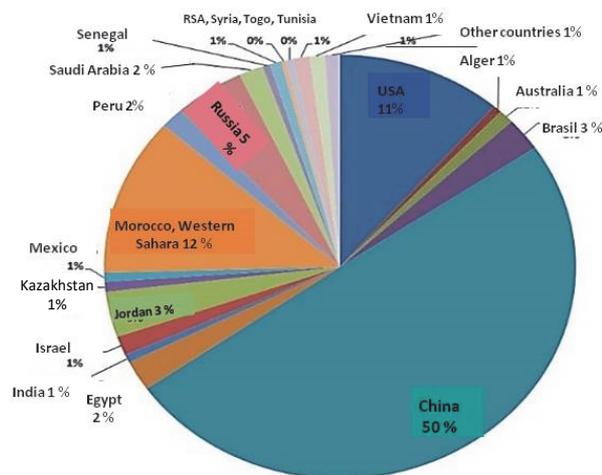


Figure 4. China's share in world phosphate market

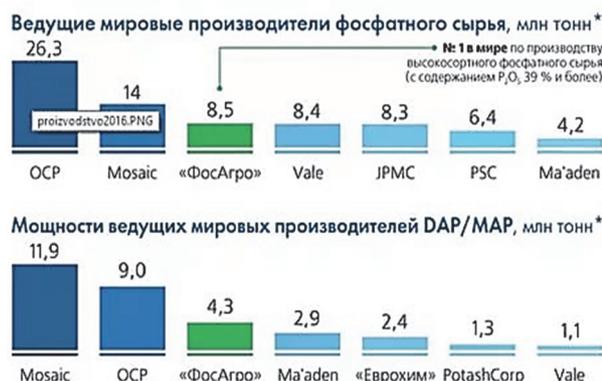
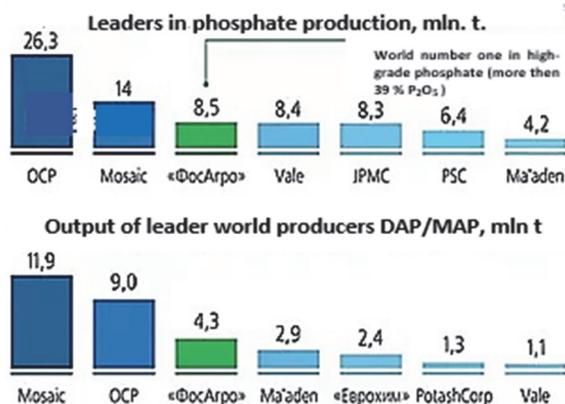


Рис. 5. Производство удобрений и ведущие производители фосфатов



[Figure 5. Fertilizers production and leader phosphate producers]

Основные потребители и импортеры фосфатов – страны южной и восточной Азии, Латинской Америки, Западной Европы. Наконец, из приведенной графики следует, что три четверти промышленных запасов фосфора связаны с фосфоритами. Магматогенные фосфаты структуроопределяющую роль играют только для ЮАР, Бразилии, России, Швеции, Канады. За полтора столетия изучения в России фосфоритов разработаны принципы классификации этих природных образований, среди которых широкой известностью пользуется классификация А.С. Соколова [4]. В ней есть как дискуссионные, так и общепризнанные положения. Оставляя за скобками дискуссионные вещи, сосредоточим внимание на генетических типах фосфоритовых месторождений. С учетом современных данных выделяются восемь типов фосфогенеза: афанитовый, микрозернистый, зернистый, желваковый, ракушечный, галечно-зернистый, песчано-зернистый, остаточно-метасоматический. Из них промышленное или потенциально-промышленное значение имеют первые пять. Их месторождения обладают запасами более 50 млн т  $P_2O_5$ , а доля добычи руд в мировом балансе достигает 1 %. Отличительные петрографические особенности таких руд можно видеть на рис. 6.

Отмеченные промышленные генетические типы также отличаются по формационной принадлежности, структурно-тектоническим, стратиграфическим, фациальным, литологическим, геохимическим и другим характеристикам. Подчеркнем два момента: 1) связь фосфогенеза с определенными геологическими эпохами и эволю-

ционный его характер; 2) принципиальные различия между афанитовым и более поздними типами фосфатонакопления.

В свое время Н.А. Красильникова (1967) обратила внимание на смену в геологическом времени глобального распространения разных промышленных генетических типов фосфоритовых месторождений и обозначила это явление как эволюцию фосфогенеза [5]. Развивая идею эволюционности фосфогенеза академик А.Л. Яншин (1988) выделил венд-кембрийскую и позднемеловую-раннепалеогеновую эпохи промышленного фосфатонакопления [6]. По его данным, в венд-кембрии сосредоточено более 15 % выявленных мировых запасов пятиоксида фосфора. Представлены они рудами афанитовых и микрозернистых генетических типов месторождений, которые в основном локализируются в пределах Азиатского континента. Еще более колоссальные скопления фосфора связаны с мел-палеогеновой эпохой. Здесь сконцентрировано 27 млрд т  $P_2O_5$ , или почти 60 % от их общих запасов. Это исключительно руды месторождений зернистого генетического типа. В основном они приурочены к Аравийско-Африканской фосфоритоносной провинции. Таким образом, особого внимания заслуживает афанитовый генетический тип месторождений, поскольку именно с него в эдиакарское время на Земле начинается промышленное фосфоритообразование. Принципиальные его отличия от более поздних типов фосфогенеза связаны с палеотектоническими обстановками в фосфоритоносных бассейнах. Афанитовое фосфатонакопление было приурочено к подвижным участкам земной коры с сейсмически активным тектоническим режимом, унаследованным от доэдиакарских рифтовых структур [1; 7]. Благодаря этому такой фосфогенез протекал на фоне ускоренной седиментации, что дало возможность максимально полно проявиться диагенетической фосфатизации осадков. Следовательно, для месторождений афанитовых фосфоритов главным фактором рудной концентрации фосфора стало его диагенетическое инситу накопление. Для других типов фосфоритовых месторождений, областью формирования их руд были мало подвижные слабо прогибающиеся структуры с медленными темпами седиментации и длитель-

ными перемивами осадков [8]. Благодаря этому возникали конденсированные разрезы из многократно перемытого и сгруженного разнообразного фосфоритового материала. Иными словами, здесь,

в отличие от афанитовых фосфоритов, главным рудообразующим механизмом концентрации фосфора были седиментационные процессы длительного шлихования фосфатных осадков.



**Рис. 6.** Петрографические типы фосфоритовых руд  
**[Figure 6.** Petrographic types of phosphorites' ores]

Таблица

**Долевое участие промышленных типов руд в структуре фосфатно-сырьевой базы Советского Союза**  
**[Table. Industrial ore types' share in phosphate-raw material resource base of USSR]**

Промышленные типы руд [Types of industrial ores]			
Апатитовые [Apatite ores]	Фосфоритовые микрозернистые [Microgranular phosphorite ores]	Фосфоритовые желваковые [Concretionary phosphorite ores]	Фосфоритовые ракушечные Shelly phosphorite ores
48 % (высокосортные / of good quality)	36 % (удовлетворительного качества / of acceptable quality)	12 % (низкокачественные / of low quality)	4 % (низкокачественные / of low quality)
Хибины, Ковдор [Khibiny, Kovdor]	Каратау [Karatau]	Центральные регионы России [Central regions of Russia]	Прибалтийские регионы [Baltic regions]

Все сказанное напрямую имеет отношение к фосфатной проблеме России. Как уже отмечалось, доля России в мировом производстве фосфатов составляет 6 %. Однако этот факт не снижает остроты существующей проблемы. По данным Минсельхоза, в Российской Федерации ежегодное потребление фосфорных удобрений составляет не более 630 тыс. т  $P_2O_5$  [9], в то время как по научно обоснованным нормам их вносить необходимо в два раза больше. Понятно, что такая ситуация в значительной степени связана с особенностями минерально-сырьевой базы России, которая в основном была унаследована ею от Советского Союза. Здесь необходимо вспомнить, что, несмотря на ряд негативных моментов, потенциал последней был весьма велик и позволял Советскому Союзу занимать второе место в мировой добычи и производстве фосфатов. Доле-

вое участие промышленных типов руд в структуре фосфатно-сырьевой базы Советского Союза показано в таблице.

Из сказанного следует, что на территории СССР промышленные месторождения фосфатных руд были рассредоточены неравномерно. Все они находились в европейской части России (59 %), Казахстане (36 %) и Эстонии (4 %). Гигантские пространства Сибири и Дальнего Востока не имели собственной базы для производства удобрений и целиком зависели от их поставок из европейской части страны.

К качественным рудам, пригодным для глубокой химической переработки, относились 80 % запасов фосфорного сырья СССР. Почти половина из них представлена уникальными апатитами Кольского полуострова, на базе которых создан мощный комплекс горнодобывающей промышлен-

ленности. Вторыми по значимости были руды микрозернистых фосфоритов Каратауского бассейна, ставшего вторым всесоюзным центром по добыче и производству растворимых фосфатов. Желваковые и ракушечные руды, несмотря на невысокое качество, формировали в Европейской части страны третий промышленный комплекс. Он был нацелен на выпуск дешевых удобрений из молотых фосфоритов и позволял местным аграриям меньше применять дорогие концентрированные удобрения. В целом на пике промышленного развития СССР разведанные запасы фосфатов составляли 1,3 млрд т  $P_2O_5$ , в том числе апатитов 0,6 млрд т и фосфоритов 0,7 млрд т  $P_2O_5$ . Производство фосфорных удобрений в стране достигло 7,1 млн т. Экспорт их не превышал 2 %. Однако даже в эти (лучшие) годы на поля вносились 30,5 кг  $P_2O_5$  на 1 га пашни. Это в пять раз меньше, чем в странах Западной Европы, где урожай зерновых достигал 70 ц/га.

С распадом Советского Союза резко меняется структура фосфатной сырьевой базы России. После отсечения от нее казахстанских и эстонских фосфоритоносных бассейнов она практически целиком становится ориентированной на апатитовые месторождения Кольского полуострова. По состоянию Государственного баланса запасов на 2019 г. на территории Российской Федерации учтено 23 апатитовых и 38 фосфоритовых месторождений с разведанными запасами высоких категорий в объеме 714,0 и 217,0 млн т  $P_2O_5$  соответственно [10; 11]. Однако в промышленной отработке находятся только апатитовые месторождения Хибин, а также комплексные карбонатитовые руды Ковдора. Фосфоритовые горнорудные комбинаты Европейской части России, которые в советские годы специализировались на переработке низкосортного сырья, по экономическим причинам законсервированы. Таким образом, на сегодняшний момент основу минерально-сырьевой базы страны составляют исключительно апатитовые руды Кольского полуострова. Выпускаемый здесь апатитовый концентрат содержит 39 %  $P_2O_5$  и является лучшим в мире по качеству. Объем его добычи в последние два года превысил 5 млн т, но это лишь четвертая часть от уровня его производства в Советском Союзе. В 2019 г., по данным Росстата, в стране произведено 4,3 млн т фосфорных удобрений, но только половина из них реализована на внутреннем рын-

ке. При этом, по заключению аграриев, 85 % почв России нуждается в фосфоризации. Все сказанное обнажает наиболее острые проблемы нынешнего состояния фосфатной геологии и отраслевой фосфорной промышленности в целом. К проблемам, которые требуют скорейшего решения, относятся: 1) ориентированность фосфорной промышленности на единственный, хотя и высококачественный источник минерального (apatитового) сырья и монополизированность рынка фосфорных удобрений; 2) значительная удаленность сырьевой и производственной баз фосфатов от областей развитого сельского хозяйства; 3) отсутствие на востоке страны экономически привлекательных месторождений; 4) ориентированность агрохимических предприятий на внешний рынок в ущерб российскому потребителю; 5) недостаточный объем существующих производственных мощностей для выпуска высококонцентрированных удобрений; 6) отсутствие рентабельных технологий для переработки низкокачественных фосфоритов в растворимые удобрения. Возникает вопрос: а так ли важна рассматриваемая тема, если вот уже какой год Россия выходит на первое место в мире по экспорту зерна? Не анализируя это чудо, приведем другие цифры. Только за первое полугодие прошлого года импорт в Россию молочной продукции достиг 865 млн долл., а мяса 2 млрд долл.

Таким образом, налицо существование в стране серьезной проблемы по созданию современной кормовой базы для животноводства. И решить этот вопрос отечественные аграрии вряд ли смогут без активной фосфоризации сельскохозяйственных угодий. Итак, что имеем в итоге и какими резервами можно воспользоваться для смягчения существующей ситуации? Понятно, что конкретика ответа на этот вопрос во многом зависит от экономического состояния страны, а также от динамики мировых цен на фосфаты. Но все-таки, на что можно, а на что не нужно надеяться с геологической точки зрения? Рассмотрим ситуацию по отдельным регионам.

## 1. Кольский полуостров

Регион на ближайшие десятилетия сохранит свой статус главной фосфатной сырьевой базы страны. В Хибинах из десяти разведанных месторождений в эксплуатации находятся семь, где ве-

дется карьерная и подземная добыча руд. В 2019 г. было наработано 11,3 млн т апатитовых руд. Из них 10,1 млн т выпущено ОАО «Апатит» холдинга «ФосАгро», а 1,2 млн т получено на недавно построенном руднике Олений ручей группы «ОАО Акрон». В ближайших планах этой корпорации освоение Партомчоррского месторождения. Два этих факта имеют принципиальное значение. Они показывают, что на рынке апатитового сырья появился новый игрок, способный влиять на монопольную ценовую политику холдинга «ФосАгро». С другой стороны, на цены будет оказывать все большее давление активно возрастающее истощение карьерных запасов, доля которых уже сейчас сократилась до 20 %. Переориентация добычных работ на глубокие залежи ведет к дополнительным затратам и поэтому в ближайшей перспективе неизбежен рост цен на данную продукцию

Ковдорское комплексное месторождение – второй по важности объект в структуре фосфатной-сырьевой базы России. На его долю приходится 20 % добываемого апатитового концентрата. Разрабатывает месторождение ОАО «Ковдорский ГОК» – дочерняя структура компании МХК «ЕвроХим» Предприятие производит железорудный (7,9 млн т), апатитовый (3,9 млн т) и бадделейтовый (10,1 тыс т) концентраты. Долгосрочные перспективы устойчивого развития ГОКа на фосфаты определяются:

- достоверно разведанными запасами в объеме 25 млн т  $P_2O_5$  в форме комплексных (коренных) и 7 млн т  $P_2O_5$  в виде апатит – штафелитовых (вторичных) руд коры выветривания карбонатитов;
- высоким качеством получаемых концентратов;
- комплексным составом добываемых руд;
- разработкой месторождения сверхглубоким (800 м) карьером, что позволит перенести на 30 лет строительство дорогостоящего подземного рудника.

## 2. Ленинградский регион

С запада Ленинградская область примыкает к Прибалтийскому фосфоритоносному бассейну ракушечных фосфоритов. Промышленно значимым объектом является Кингисеппское месторождение, которое находится в эксплуатации

с середины прошлого века. Производственное объединение «Фосфорит» компании «ЕвроХим» проводит полный цикл освоения месторождения. Получаемый здесь концентрат содержит 28 %  $P_2O_5$ . После смешивания с кольским апатитом готовый продукт пригоден для получения высококачественных растворимых удобрений.

По расчетам специалистов «ЕвроХим» себестоимость концентрата Кингисеппского месторождения превышает более чем в два раза себестоимость фосфатов месторождений Марокко и Туниса, что делает продукцию компании неконкурентоспособной на мировом рынке. В связи с этим эксплуатация месторождения прекращена, а производство объединения «Фосфорит» переориентировано на переработку ковдорского апатита. Надежды на возрождение интереса к ракушечным фосфоритам Кингисеппского месторождения, а также к другим окружающим его перспективным площадям, дает завершение строительства на Балтике самого большого в Европе Усть-Лугжского торгового морского порта. Полный ввод его мощностей будет способствовать росту экономической деятельности и привлечению в регион крупных инвестиций, в том числе для освоения его минеральных богатств. В частности, уже сейчас у инвесторов появился интерес к северным фосфоритоносным площадям. Однако первостепенного внимания требует Волосовская площадь с прогнозными ресурсами 190 млн т  $P_2O_5$  семипроцентных руд [12]. Продуктивная пачка Волосовской площади на глубинах 100 м представлена обводненными песками, что благоприятствует организации скважинной гидродобычи. В конце советского периода технология таких работ была освоена в Институте горно-химического сырья группой профессора В.Ж. Аренса [13].

## 3. Центральная Россия

Фосфоритоносность региона связана главным образом с месторождениями труднообогатимых желваковых фосфоритов Волжского и Днепровско-Донецкого бассейнов. В их контурах разведано более 200 фосфоритовых залежей разного масштаба. Карьерами горно-обогатительных комбинатов отрабатывались Вятско-Камское (109 млн т  $P_2O_5$ , Кировская область), Егорьевское (30,6 млн т  $P_2O_5$ , Московская область) и Полпинское (10,9 млн т

$P_2O_5$ , Брянская область) месторождения. Общий объем производимой фосфоритной муки достигал 4 млн т в год. Половина ее выпускалась подмосковным комбинатом «Фосфаты», продукция которого поставлялась вплоть до Дальнего Востока.

Отсутствие рентабельных технологий переработки желваковых фосфоритов в растворимые удобрения стало причиной закрытия горно-обогатительных комбинатов и утраты интереса к месторождениям этих фосфоритов. В частности, свернуты проекты по освоению Кимовского и Уколовского месторождений в Тульской и Курской областях. Прекращена разработка Слюдяковского месторождения в Татарстане и Сординского участка Вятско-Камского месторождения в Кировской области. Это не означает, что фосмука перестает быть востребованным удобрением. Просто из-за низкой платежеспособности российского потребителя в ближайшей перспективе производство фосмуки будет оставаться нерентабельным. Исключением станет запланированное в 2021 г. освоение в Тамбовской области титан-циркониевого россыпного месторождения Центральное. Рудный пласт его сопровождается желваковыми фосфоритами. Разведанные запасы фосфоритов оценены в 3,9 млн т со средним 18 % содержанием  $P_2O_5$  в мытом концентрате [14].

#### 4. Сибирский и Дальневосточный регионы

Фосфатно-сырьевую базу региона в объеме 2,2 млрд т  $P_2O_5$ , формируют апатитовые (1,4 млрд т  $P_2O_5$ ) и фосфоритовые (0,8 млрд т  $P_2O_5$ ) месторождения. Несмотря на столь серьезный потенциал по экономическим и экологическим причинам ни один из указанных объектов не готов к освоению. В качестве кратких пояснений отметим следующее. Месторождения фосфоритов представлены афанитовым (V), гравийно-ракушечным (O) и коры выветривания типами. С точки зрения объемов запасов, опробированности схем обогащения руд практически значимыми являются афанитовые месторождения Окино-Хубсугульского бассейна, но они расположены в труднодоступных горах Юго-Восточного Саяна. Значительно более выгодное географическое положение занимают многочисленные месторождения фосфоритов коры выветривания юга Красноярского края, Хакасии и Иркутской области. Однако, как и в случае с жел-

ваковыми фосфоритами, отсутствие технологических схем химической переработки руд в растворимые удобрения делают их малопривлекательными для инвесторов.

Среди апатитовых месторождений выделяются типы, связанные с редкометальными карбонатами, щелочными ультрабазитами, кораи их выветривания, а также с габбро-диоритовыми и метаморфогенными комплексами. Разведанные запасы апатита насчитываются в сумме 302 млн т  $P_2O_5$ . Из них в качестве потенциально активных можно рассматривать запасы, связанные с метаморфитами Селигдарского месторождения (86 млн т  $P_2O_5$ ) в Якутии и Ошурковским габбро-диоритовым массивом (109 млн т  $P_2O_5$ ) в Бурятии [15]. Выгодной ситуацией для обоих объектов является их расположение в районах с хорошо развитой инфраструктурой. Тем не менее, несмотря на столь очевидные преимущества, ожидать, что в ближайшие годы эти месторождения начнут обрабатываться, не приходится. Непреодолимым препятствием для освоения Ошурковского месторождения будет оставаться приуроченность его к природно-охранной зоне озера Байкала. Освоение Селигдарского месторождения требует вложений не менее 1,5 млрд долл. Поиск инвестора сдерживает:

- значительная удаленность будущего производства от потребителя конечной продукции;
- высокая радиоактивность руд;
- низкое их качество и сложная флотационная технология обогащения.

Таким образом, картина получается неоднозначной. С одной стороны, на территории Сибири уже сейчас известны геологические объекты, которые могут стать базой для организации фосфорного производства. С другой стороны, из-за их труднодоступности, невысокого качества запасов, а также специфики условий отработки не следует ожидать в ближайшие годы появления крупных предприятий, способных кардинально решить на востоке России данную проблему. Поэтому важнейшей задачей геологической службы страны остается создание здесь мощного центра фосфорной отрасли по типу Кольского промышленного кластера. В свете сказанного принципиальное значение приобретает Северный морской путь. Запланированные темпы его развития открывают уникальные возможности по экономическому освоению Таймыро-Анабарского региона. Здесь сосредоточены огромные ресурсы апатитоносных

карбонатитов Томпторского щелочного массива и Меймеча-Котуйской провинции [16; 17]. Освоение этих объектов позволит превратить регион в мощный центр фосфорной промышленности.

## Заключение

Почвы России испытывают острый дефицит фосфора, что негативно влияет на эффективность сельскохозяйственного производства страны. Дефицит фосфора связан с особенностями отечественной минерально-сырьевой базы. Россия занимает четвертое место в мире по запасам фосфатов, обладая уникальными месторождениями апатитов Кольского полуострова. Однако сдерживающим фактором в развитии фосфорной промышленности является крайне неравномерное распределение в пределах России месторождений фосфатов и невысокое качество их руд. Учитывая это, для геологических служб страны важнейшей задачей остается выявление в регионах месторождений высококачественных фосфатных руд.

## Список литературы

1. Георгиевский А.Ф. Афанитовый генетический тип промышленных фосфоритов: геологические особенности, типы руд, перспективные технологии обогащения и утилизации отходов (на примере Окино-Хубсугульского бассейна): дис. ... д. г.-м. н. М., 2016. 429 с.

2. Hoefl R., Peck T.R. Soil fertility // Illinois Agronomy Handbook. 2000. Рр. 84–1243.

3. Рассохина Л.Ю., Белова Н.П., Леонов В.Т., Хватова Е.В., Шаповал В.В. Переработка низкосортных фосфоритов на комплексные минеральные удобрения // Вестник Казанского технологического университета. 2006. № 3. С. 85–91.

4. Соколов А.С. Генетическая классификация месторождений фосфатных руд // Известия вузов. Серия: Геология и разведка. 1995. Вып. 5. С. 59–68.

5. Красильникова Н.А. Фосфориты Сибири – закономерности геологического размещения и перспективы поисков: автореф. дис. ... д. г.-м. н. М., 1966. 27 с.

6. Янин А.Л., Жарков М.А. Эпохи и эволюция фосфатонакопления в геологической истории // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1986. Т. 61. Вып. 2. С. 7–19.

7. Ильин А.В. Древние (эдиакарские) фосфориты. М.: ГЕОС, 2008. 157 с.

8. Еганов Э.А. Структура комплексов фосфоритоносных отложений. Новосибирск: Наука, 1983. 135 с.

9. Непряхин А.Е., Беляев Е.В., Карпова М.И., Лужбина И.В. Фосфоритовая составляющая МСБ России в свете новых данных технологических возможностей // Георесурсы. 2015. Т. 1. Вып. 4 (63). С. 67–74.

10. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 2019 год. Апатитовые руды / Российский федеральный геологический фонд. URL: <https://rfgf.ru/bal/itemview.php?iid=7895> (дата обращения: 22.04.2020).

11. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 2019 год. Фосфоритовые руды / Российский федеральный геологический фонд. URL: <https://rfgf.ru/bal/> (дата обращения: 22.04.2020).

12. Саммет Э.Ю., Насонова Л.Д. Волосовская площадь – новый перспективный фосфоритоносный район Ленинградской области // Геология ракушечных фосфоритов Прибалтики. Таллин: Ин-т геологии АН ЭССР, 1992. С. 91–97.

13. Аренс В.Ж., Бабичев Н.И., Баикатов А.Д., Гридин О.М., Хрулев А.С., Хчян Г.Х. Скважинная гидродобыча полезных ископаемых. М.: Горная книга, 2007. 295 с.

14. Схема территориального планирования Рассазовского муниципального района Тамбовской области. Т. 1 / ОАО «Российский институт градостроения и инвестиционного развития “ГИПРОГОР”». М., 2009.

15. Батуева А.А., Дугданова Е.Е. Путеводитель полевой экскурсии «Ошурковское месторождение апатита (Западное Забайкалье)». Улан-Удэ: ГИН СО РАН, 2017. 16 с.

16. Похиленко Н.П., Крюков В.А., Толстой А.В., Самсонов Н.Ю. Томтор как приоритетный инвестиционный проект обеспечения России собственным источником редкоземельных элементов // ЭКО. 2014. № 2. С. 22–32.

17. Егоров Л.С. Ийолит-карбонатитовый плутонизм (на примере Маймеча-Котуйского комплекса Полярной Сибири). Ленинград: Недра, 1991. 260 с.

## Для цитирования

Георгиевский А.Ф., Бугина В.М. Современное состояние и перспективы развития фосфатно-сырьевой базы России // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 197–207. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-3-197-207>

## Actual situation and prospects for the development of the phosphate-raw material base of Russia

Alexey F. Georgievskiy, Viktoriya M. Bugina

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

### Article history:

Received: April 9, 2020

Revised: April 25, 2020

Accepted: July 16, 2020

### Keywords:

phosphorus deficiency, productivity, mineral fertilizers, export, raw material base, phosphorite and apatite deposits, phosphogenesis, phosphate production, ores types and reserves

**Abstract.** The article analyzes the state of the phosphate raw material base in Russia and its role in the economic development of the country and in domestic agriculture especially. The problems that prevent the creation of a modern powerful phosphate production capable of satisfying the existing demands of agriculture in phosphoric mineral fertilizers are highlighted. The possible directions of the development of the phosphorus industry in the regions for the near and distant prospects are analyzed. The aim of the article is to analyze the current state of the domestic mineral resource base to produce phosphorus fertilizers, the acute shortage of which hinders the development of the country's agriculture. Actual base for research was mainly processed materials from specialized scientific articles and publicly available publications. In addition, data collected by the authors during thirty years of studying phosphorite deposits in Russia and foreign countries were involved. The analysis of published materials of leading Russian producers of phosphorus products, mining companies, databases of specialized federal and regional geological companies. It is concluded that before the country's geological services, the most important task remains to identify deposits of high-quality phosphate ores, and especially in Siberia and the Russian Far East. Significant prospects for the development of these regions are opened by the Northern Sea Route. The planned pace of its development offers unique opportunities for the economic development of the Taimyr-Anabar region, where huge resources of apatite-bearing carbonatites of the Tomptor alkaline massif and Meimech-Kotuy province are concentrated.

### References

1. Georgievskiy AF. *Afanitovyy geneticheskij tip promyshlennyh fosforitov: geologicheskie osobennosti, tipy rud, perspektivnye tehnologii obogashhenija i utilizacii othodov (na primere Okino-Hubsugul'skogo bassejna)* [Aphanitic genetic type of industrial phosphorites: geological features, types of ores, promising technologies for the processing and disposal of waste (the Okino-Khubsugul basin)] (Dissertation of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences). Moscow; 2016. (In Russ.)
2. Hoefl R, Peck TR. Soil fertility. *Illinois Agronomy Handbook*. 2000:84–124.
3. Rassohina LJu, Belova NP, et al. Pererabotka nizkosortnyh fosforitov na kompleksnye mineralnye udobrenija [Processing low-grade phosphorites to complex mineral fertilizers]. *Bulletin of Technological University of Kazan*. 2006;(3):85–91. (In Russ.)
4. Sokolov AS. Geneticheskaja klassifikacija mestorozhdenij fosfatnyh rud [Genetic classification of phosphate ore deposits]. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Series: Geology and Prospecting*. 1995;(5): 59–68. (In Russ.)
5. Krasilnikova NA. *Fosfority Sibiri – zakonomernosti geologicheskogo razmeshhenija i perspektivy poiskov* [Phosphorites of Siberia – patterns of geological location and prospects for searches]. Moscow; 1966. (In Russ.)
6. Janshin AL, Zharkov MA. Jepohi i jevoljucija fosfatonakoplenija v geologicheskoi istorii [Epochs and evolution of phosphate accumulation in geological history]. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Department*. 1986;61(2):7–19. (In Russ.)

**Alexey F. Georgievskiy**, Associate Professor of the Department of Mineral Developing and Oil & Gas Business of the Engineering Academy of the RUDN University; Doctor in Geology and Mineralogy; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4835-760X>, eLIBRARY SPIN-code: 1308-9195; georgievskiy-af@rudn.ru  
**Viktoriya M. Bugina**, Associate Professor of the Department of Mineral Developing and Oil & Gas Business of the Engineering Academy of the RUDN University; PhD in Geology and Mineralogy; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6492-6628>, eLIBRARY SPIN-code: 8410-3861.

7. Ilin AV. *Drevnie (jediakarskie) fosfority [Ancient (Ediacaran) phosphorites]*. Moscow: GEOS Publ.; 2008. (In Russ.)
8. Eganov JeA. *Struktura kompleksov fosforitonosnyh otlozhenij [The structure of phosphorite bearing complexes]*. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1983. (In Russ.)
9. Neprijahin AE, Beljaev EV, et al. Fosforitovaja sostavljajushhaja MSB Rossii v svete novyh dannyh tehnologicheskikh vozmozhnostej [Phosphorite component of the SME of Russia in the light of new data on technological capabilities]. *Georesources*. 2015;1(4–63):67–74. (In Russ.)
10. Russian Federal Geological Fund. *Gosudarstvennyj balans zapasov poleznyh iskopaemyh Rossijskoj Federacii na 2019 god. Apatitovye rudy [State balance of mineral reserves of the Russian Federation for 2019. Apatite ores]*. (In Russ.) Available from: <https://rfgf.ru/bal/itemview.php?iid=7895> (accessed: 22.04.2020).
11. Russian Federal Geological Fund. *Gosudarstvennyj balans zapasov poleznyh iskopaemyh Rossijskoj Federacii na 2019 god. Fosforitovye rudy [State balance of mineral reserves of the Russian Federation for 2019. Phosphorite ores]*. (In Russ.) Available from: <https://rfgf.ru/bal/> (accessed: 22.04.2020).
12. Sammet JeJu, Nasonova LD. Volosovskaja ploshhad' – novyj perspektivnyj fosforitonosnyj rajon Leningradskoj oblasti [Volosovskaya area – a new promising phosphorite-bearing region of the Leningrad region]. *Geology of Shelly Phosphorites of the Baltic States*. Tallinn: Institute of Geology, Academy of Sciences of the ESSR; 1992. p. 91–97. (In Russ.)
13. Arens VZh, Babichev NI, et al. *Skvazhinnaja gidrodobycha poleznyh iskopaemyh [Borehole hydraulic mining of minerals]*. Moscow: Gornaya kniga Publ.; 2007. (In Russ.)
14. Russian Institute of Urban Planning and Investment development “GIPROGOR”. *Shema territorial'nogo planirovanija Rasskazovskogo municipal'nogo rajona Tambovskoj oblasti [Scheme of territorial planning of the Rasskazovsk municipal district of the Tambov region]* (vol. 1). Moscow; 2009. (In Russ.)
15. Batueva AA, Dugdanova EE. *Putevoditel' polevoj jekskursii “Oshurkovskoe mestorozhdenie apatita (Zapadnoe Zabajkal'e)” [Field excursion guide “Oshurkovsky apatit deposit (Western Transbaikal)”]*. Ulan-Ude: Geological Institute of Russian Academy of Sciences, Siberian Department; 2017. (In Russ.)
16. Pohilenko NP, Krjukov VA, et al. Tomtor kak prioritetyj investicionnyj proekt obespechenija Rossii sobstvennym istochnikom redkozemel'nyh jelementov [Tomtor as a priority investment project to provide Russia with its own source of rare earth elements]. *ECO*. 2014;(2):22–32. (In Russ.)
17. Egorov LS. Ijolit-karbonatitovyj plutonizm (na primere Majmecha-Kotujnskogo kompleksa Poljarnoj Sibiri) [Ijolite-carbonatite plutonism (on the example of the Maymecha-Kotuy complex of Polar Siberia)]. Leningrad: Nedra Publ.; 1991. (In Russ.)

#### For citation

Georgievskiy AF, Bugina VM. Actual situation and prospects for the development of the phosphate-raw material base of Russia. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(3):197–207. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-3-197-207>

СТРОИТЕЛЬСТВО  
CIVIL ENGINEERING (CONSTRUCTION)

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-3-208-214

UDC 624.046.3

Research article

**Geometric nonlinear analysis of  
thin elastic paraboloid of revolution shaped shells with radial waves****Mathieu Gil-oulbé, Aleksey S. Markovich, Prosper Ngandu, Svetlana V. Anosova**

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

*Article history:*

Received: July 28, 2020

Revised: August 13, 2020

Accepted: September 22, 2020

*Keywords:*

paraboloid of revolution with radial waves, physical nonlinearity, contact nonlinearity, boundary condition nonlinearity, thin shell

*Abstract.* From the old ancient types of roof and dome construction, various forms of shells have been discovered which attract special attention. A shell is a structure composed of sheet material so that the curvature plays an important role in the structural behaviour, realizing its spatial form. There are different types of shells, namely thick and thin shells. G. Brankov, S.N. Krivoshapko, V.N. Ivanov, and V.A. Romanova made interesting researches of shells in the form of umbrella and umbrella-type surfaces. The term “nonlinear” refers to a given structure undergoing a change in stiffness in its loaded state. There are basically three different types of nonlinearities: geometric, physical and contact (boundary condition nonlinearity). For further analysis of the stress-strain state, a paraboloid with an inner radius of 4 m and an outer radius of 20 m and the number of waves equal to 6 was considered. The test shell is made of reinforced concrete. The minimum load parameter at which the shell loses stability indicates a more than three times the margin.

**Introduction**

A shell is a structure composed of sheet material so that the curvature plays an important role in the structural behaviour, realizing its spatial form.

**Mathieu Gil-oulbé**, Associate Professor of the Department of Civil Engineering of the Academy of Engineering of the RUDN University; PhD in Civil Engineering; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0057-3485>, eLIBRARY Author ID: 2726-1171.

**Aleksey S. Markovich**, Associate Professor of the Department of Civil Engineering of the Academy of Engineering of the RUDN University; PhD in Civil Engineering; eLIBRARY Author ID: 28379821; [markovich-as@rudn.ru](mailto:markovich-as@rudn.ru)

**Prosper Ngandu**, undergraduate student of the Department of Civil Engineering of the Academy of Engineering of the RUDN University.

**Svetlana V. Anosova**, undergraduate student of the Department of Civil Engineering of the Academy of Engineering of the RUDN University.

© Gil-oulbé M., Markovich A.S., Ngandu P., Anosova S.V., 2020

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



There are different types of shells, namely thick and thin shells. A shell is called thin if

$$\frac{1}{1000} \leq \frac{h}{R} \leq \frac{1}{20},$$

where  $R$  is the radius of curvature of the middle surface and  $h$  is its thickness.

Hence, shells for which this inequality is violated are referred to as thick shells.

From the old ancient types of roof and dome construction, various forms of shells have been discovered which attract special attention. Until present day in the centre of city of Rome stands a masterpiece of ancient shell construction and has withstood for almost two-thousand years called Panthe-

on. Its span of 43 meters still impresses the modern engineering profession. The Hagia Sophia is a second example of the structural capacity of the classical builders. It was built in the 6<sup>th</sup> century, however, damages from earthquakes and fires have drastically altered the structure giving the building the appearance that it has today.

The modern era of shell structures started in 1925 with the completion of the first thin reinforced concrete shell covering the Zeiss planetarium in Jena, Germany, this delayed the development of methods of strength analysis. It was, however, a few years earlier, in the beginning of the 20<sup>th</sup> century that throughout Europe several reinforced concrete shell structures arose [1], inspired by the new material reinforced concrete, patented and promoted by Joseph Monier, who was then a French gardener. These early ‘thick’ shells are mostly documented in national literature only, and, therefore, less accessible for historical research. An example is the dome of the 1914 Cenakel church by J.G. Wiebenga, constructed in Nijmegen in the east of the Netherlands.

## 1. Literature overview

The most complete work on the history of the development of umbrella shells in modern architecture is a monography of G. Brankov [2]

In a paper [3], S.N. Krivoschapko explains in detail the different types of paraboloid umbrella-type structures and their formation. Six different types of umbrella-type surfaces with parabolic meridians are known. Different types of identical fragments form each shell type with different number of waves. He gives a comparative analysis on the differences of the umbrella-type surfaces with parabolic meridians with radial waves.

In a review article [4], principal achievements of science and engineering in the sphere of design, construction, and static, vibrational, and buckling analysis of thin-walled structures and buildings in the shape of paraboloid surfaces of revolution are summarized. These shells are useful as roof structures, TV towers, reinforced concrete water tanks, and dams. They are also used as supports for electric power transmission lines and as high chimneys. Several public and industrial buildings having the paraboloid form are described in the review. The basic results of theoretical and experimental investigations of stress-strain state, buckling, and vibration are presented. The influence of temperature and moisture on the stress-strain state of the shells in question is also analysed.

In a book [5] J.N. Reddy presents the theory and computer implementations of the finite element method as applied to nonlinear problems of heat transfer and similar field problems, fluid mechanics, and solid mechanics (elasticity, beams and plates). Both geometric as well as material nonlinearities are considered, and static and time-dependent responses are studied.

The information on the application of shells in the form of the paraboloid of revolution with radial waves is given in a paper [6]. V.N. Ivanov [7] was the first who used a finite difference energy method for the determination of stress-strain state of an umbrella-type shell. But A.S. Chepurenko with colleagues [8] applied a finite element method for this aim. V.A. Ro-anova [9] offered a method of visualization of generating umbrella-type and umbrella surfaces with radial damping waves in the central point. O. Ariarskyi with colleagues [10] investigated the advantages of umbrella-type shells in comparison with the shells in the form of their base surfaces of revolution.

Shells of this type attract the attention of students of the Department of Civil Engineering of the Academy of Engineering of the RUDN University. They take them for the investigation in their degree works [11]. This paper will help them to continue their researches.

## 2. Types of nonlinearities

The term “nonlinear” refers to a given structure undergoing a change in stiffness in its loaded state.

There are three different types of nonlinearities: geometric, material, contact (boundary condition non-linearity).

In FEA, nonlinearity means that the stiffness matrix ( $K$ ) changes with the solution,  $K$  is a function of the nodal displacements; as  $K$  changes, a new solution must be attained until the thus iterated solution stops changing within tolerances.

**Materials nonlinearity.** Material non-linearity is the transfer of material behaviour from elastic to plastic (where elastic corresponds to a linear behaviour and plastic corresponds to a nonlinear behaviour). Even for a plastic material, initial portions of the stress strain graph tend to be linear and then become nonlinear post the Proportional limit (as shown in the Figure 1). From the graph in that figure, it’s observed that the stiffness changes because of material property. Simply speaking, if the relation stress-strain is nonlinear we have material nonlinearity.

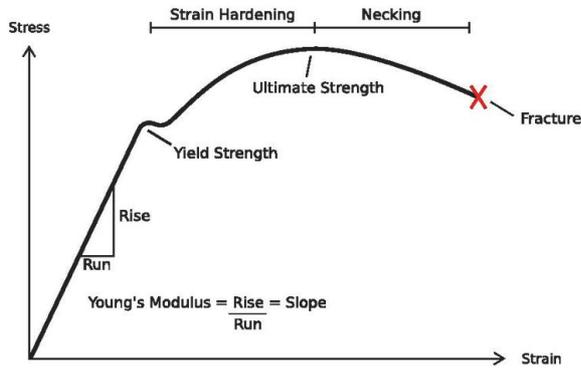


Figure 1. Material stress-strain diagram

**Boundary conditions nonlinearity.** This is when the boundary conditions defined in the simulation change during an analysis. For example, consider a deflecting cantilever beam (Figure 2, a).

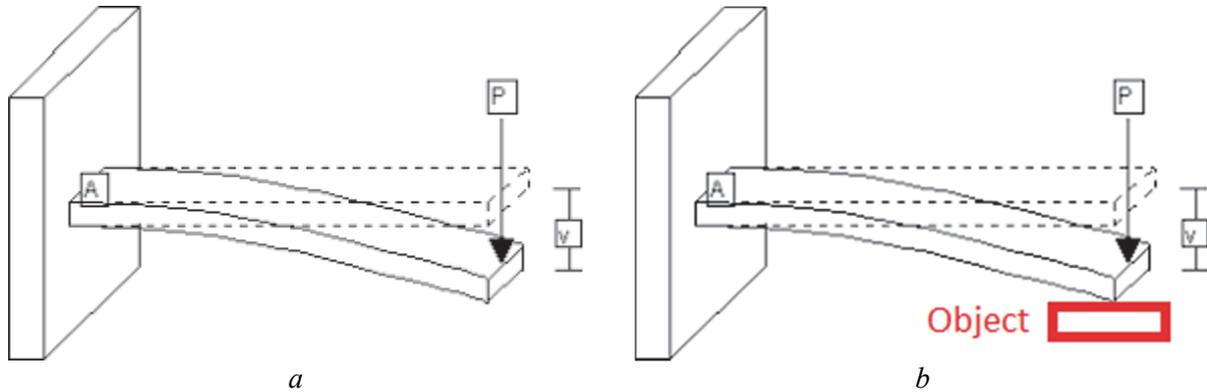


Figure 2. Deflecting cantilever beam

**Geometric nonlinearity.** Simply speaking, if the relation displacement-strain is nonlinear we have geometrical nonlinearity. As a simple example of geometrical nonlinearity, one can mention the case of elastic buckling of a column and the corresponding Euler equation. In this case, the deformation of column (when it buckles) is so high that the effect of secondary moments due to axial force have to be taken into consideration.

### 3. The parametric definition of the median surface

A paraboloid of revolution with radial waves is generated by plane parabolas the picks of which coincide with a central fixed point. Tangents drawn through the central points of parabolas must be in the same plane. Any cross section of the surface by the plane passing through the  $z$ -axis will be a parab-

Now, consider an object in the path of the deflection (Figure 2, b). Between the two above figures, the boundary conditions have changed. The cantilever beam can no longer deflect as the object prevents its deflection. This is what is meant by boundary condition nonlinearity. Here a boundary condition may be added or removed during the finite element run like gap analysis. Other examples include analyses having friction contacts.

Contact nonlinearity occurs when, due to the deformation of one or more parts in contact (pushing or pulling on other) produces a deformation leading to a change in the geometry of the part that translates into a change on  $K$  or on the forces (action and reaction) between the parts in contact forcing another iteration on approaching the solution.

1a. The parametrical equations of this surface of umbrella type can be represented as [12]

$$x(u, v) = u \cos v; y(u, v) = u \sin v;$$

$$z(u, v) = [a \sin(nv) + b] u^2,$$

where  $v$  is an angle taken from the  $x$ -axis in the direction of the  $y$ -axis;  $a = \text{const}$  is an amplitude of the wave;  $n$  is a number of peaks of the waves;  $b$  is a constant parameter of the base paraboloid of evolution.

The curvilinear coordinate lines  $u, v$  are not lines of principle curvatures. If we take  $a = b$  then lower wave picks will be on the  $xOy$  plane as show in the plotted surface below (Figure 3).

For further analysis of the stress strain state, we consider a paraboloid with an inner radius of 4 m and an outer radius of 20 m and the number of waves equal to 6 (Figure 4). Suppose the test shell is made of reinforced concrete [13–15].

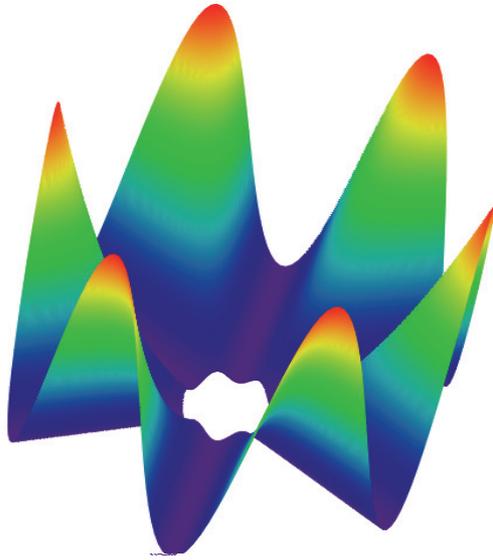


Figure 3. Paraboloid of revolution with radial waves

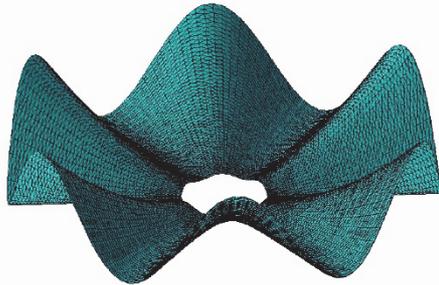


Figure 4. The finite element model of the paraboloid shell

The finite element analysis of the shell was performed in the certified LIRA-SAPR software package. The calculation was performed in a linear setting.

The finite element model of the shell (Figure 4) consists of 15 000 elements and 7650 nodes, the total number of nodal unknowns is 43 953. Flat surface triangular shell elements with six degrees of freedom in the node were used to model the surface.

The boundary conditions corresponded to free support on the inner ring and lower radial generatrices.

The stability calculation was carried out under the assumption of elastic work of the material in accordance with the graph shown in Figure 5. In this case, the redistribution of forces and the possibility of cracking were taken into account approximately by lowering the stiffness of the shell. The elastic modulus  $E$ , taken in the calculation, was determined by multiplying the initial elastic modulus of concrete  $E_0$  by a factor of 0.3.

Thus, the calculation was carried out with the following material parameters: shell thickness  $h = 16$  cm, elastic modulus  $E = 9000$  MPa; Poisson's ratio  $\nu = 0.2$ ; specific gravity  $\gamma = 25$  kN/m<sup>3</sup>.

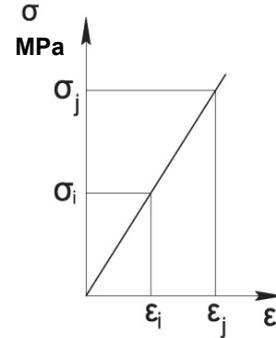


Figure 5. To linear calculation: diagram  $\sigma$ - $\epsilon$  of the material

The shell stability calculations were carried out on the main combination of loads:

$$q = 1.1g + 1.4S \text{ [kN/m}^2\text{]}, \quad (1)$$

where  $g$  is the normative value of the shell self-weight ( $g = 3.5$  kN/m<sup>2</sup>);  $S$  is the normative value of the snow load ( $S = 1.8$  kN/m<sup>2</sup>).

Deflections (Figure 3) were determined from the calculation of the shell for the normative combination of loads as a result of solving the resolving system of equations of the form

$$[K]\{z\} = \{P\}, \quad (2)$$

where  $[K]$  is the structural rigidity matrix;  $\{z\}$  is the vector of nodal displacements;  $\{P\}$  – vector of nodal loads.

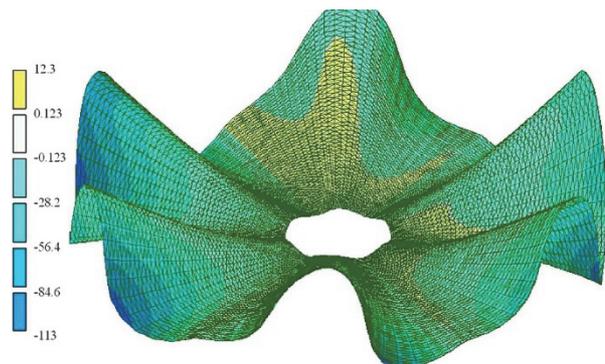
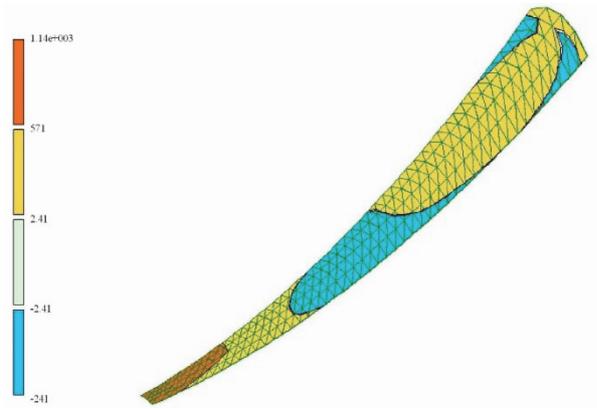


Figure 6. Fields of vertical displacements of the shell

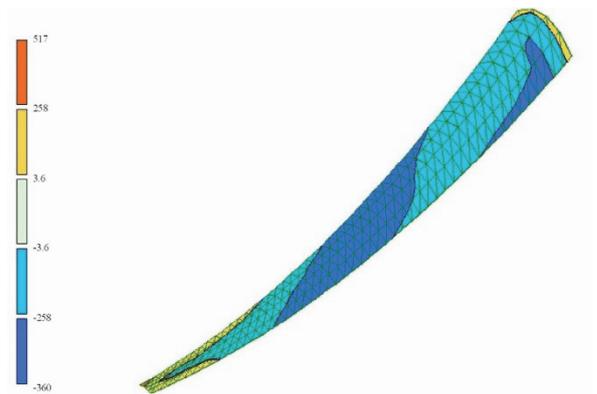
The maximum deflections of the radial generatrix do not exceed 1/150 of the span of the shell (Figure 6).

Due to the symmetry of the shell, it is sufficient to investigate the stress state of its single wave.

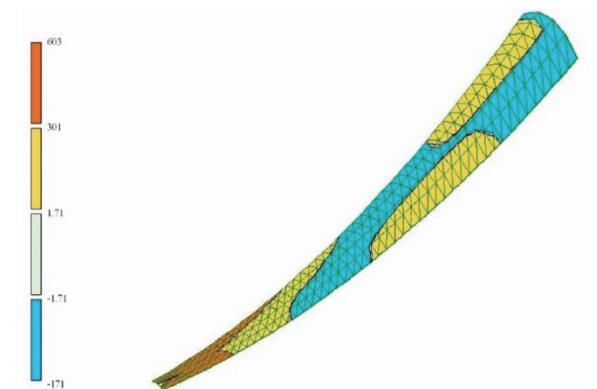
Figures 7–12 show the fields of normal and tangential stresses, as well as linear moments obtained as a result of calculating the shell for the calculated combination of loads.



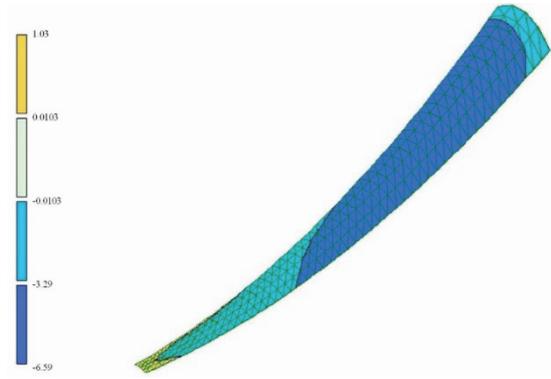
**Figure 7.** Fields of normal stresses in the radial direction,  $\text{kN/m}^2$



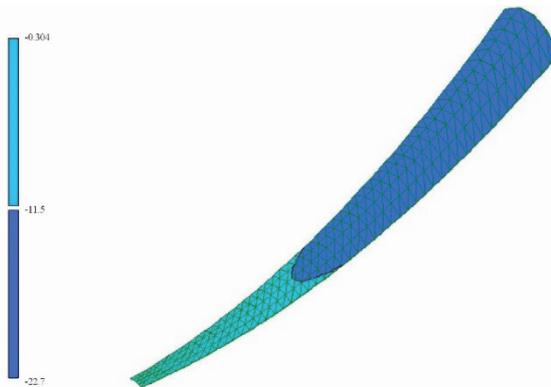
**Figure 8.** Fields of normal stresses in the circumferential direction,  $\text{kN/m}^2$



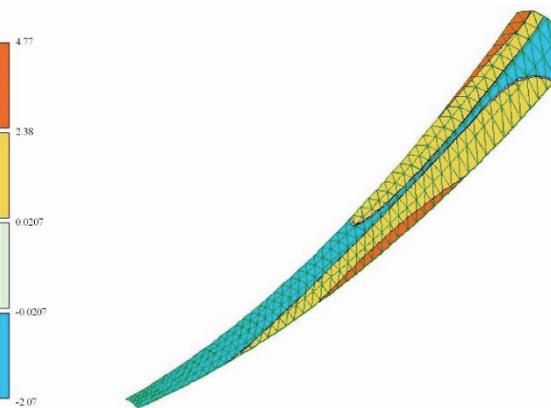
**Figure 9.** Fields of tangential stresses,  $\text{kN/m}^2$



**Figure 10.** Fields of bending moments in the radial direction,  $\text{kNm/m}$



**Figure 11.** Fields of bending moments in the circumferential direction,  $\text{kNm/m}$



**Figure 12.** Fields of torques,  $\text{kNm/m}$

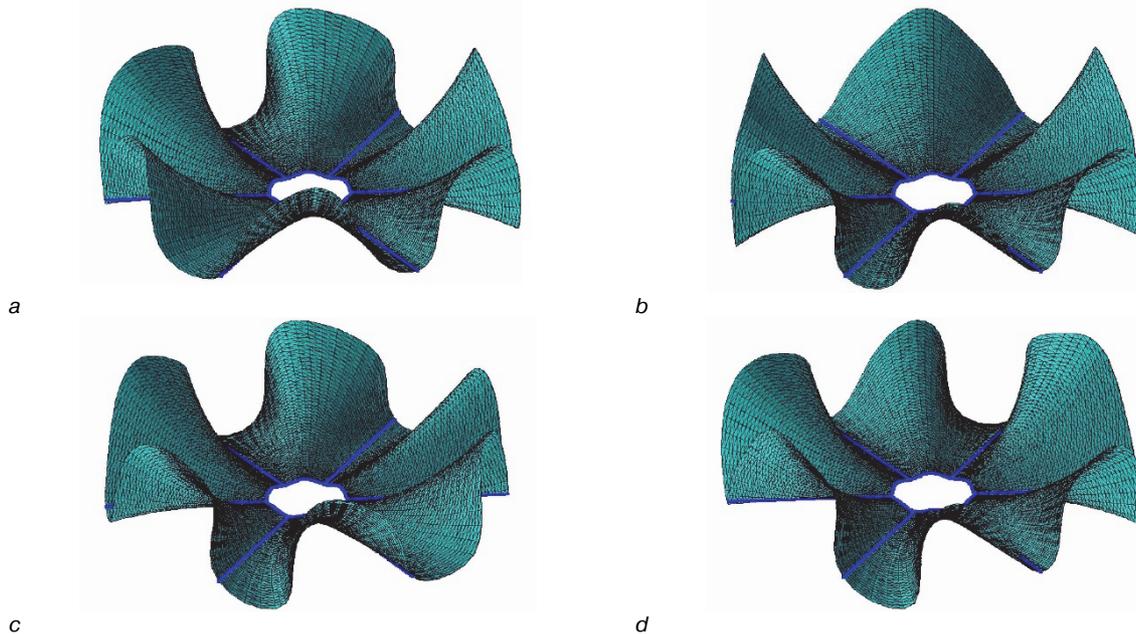
It is known, the solution of the stability problem by the finite element method reduces to a generalized eigenvalue problem

$$[K - \lambda K_\sigma]\{\varphi\} = 0, \quad (3)$$

where  $\lambda$  is the load parameter at which the structure goes into an adjacent equilibrium state;  $\{\varphi\}$  is the

eigenvector corresponding to  $\lambda$ ;  $[K]$  – structural rigidity matrix;  $[K_0]$  is the matrix of initial stresses determined from a linear calculation.

Figure 13 show the forms of shell stability loss and the load parameter  $\lambda$  corresponding to each form.



**Figure 13.** The buckling of the shell:  
 a – the form 1 ( $\lambda = 3,768$ ); b – the form 2 ( $\lambda = 4,000$ ); c – the form 3 ( $\lambda = 4,285$ ); d – the form 4 ( $\lambda = 5,000$ )

The minimum load parameter at which the shell loses stability indicates more than three times the margin.

## Conclusion

Thus, it was established that a significant contribution to the overall stress state of the shell of the considered form is made by normal and tangential stresses. In addition, the influence of bending forces acting in the circumferential direction is also great. The values of moments in the radial direction were lower than those in the circumferential direction by 50–75%.

The minimum load parameter at which the shell loses stability indicates a more than three times the margin.

May be, the results of these researches will attract Russian and foreign engineers and architects for additional working out.

## References

1. Krivoshapko SN, Mamieva IA. *Analiticheskie poverhnosti v arhitekture zdaniy, konstruktziy i izdeliy* [Analytical Surfaces in Architecture of Buildings, Structures, and Products]. Moscow: Librocom Publ.; 2018
2. Brankov G. *Corrugated shell structures*. Bulg. Academy of Science; 1961.

3. Krivoshapko SN. New examples of surfaces of umbrella type and their coefficients of fundamental forms of surfaces. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2005;(2):6–14.

4. Krivoshapko SN. On application of parabolic shells of revolution in building in 2000–2017. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2017;(4):4–14.

5. Reddy JN. *An introduction to nonlinear finite element analysis*. New York: Oxford University Press; 2005.

6. Krivoshapko SN. The opportunities of umbrella-type shells. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020;16(4):271–278. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-4-271-278>

7. Ivanov VN. Analyses of stress-strain state of roofing of trade center in the form of umbrella shell by difference variation method. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2008;(4):86–89.

8. Chepurmenko AS, Kochura VG, Saybel AV. Finite elemental analysis of the stress deformed condition of waveform shells. *Construction and Industrial Safety*. 2018;11(63):27–31.

9. Romanova VA. Visualization of forming of umbrella-type and umbrella surfaces with radial damping waves in the central point. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2015;(3):4–8.

10. Ariarskyi O, Shagalova I, Kravchenko T, Kulakova E. Umbrella surfaces morphology and their application in the architecture and design. *Pratzi TDATU*. 2011;4(49):178–190.

11. Mamieva IA. Large-span structures in diploma projects of students architects of RUDN University. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020;16(3):233–240.

12. Krivoshapko SN. Geometrical investigations of surfaces of umbrella type. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2005;(1):11–17.

13. Bradshaw R, Campbell D, Gargari M, Mirmiran A, Tripeny P. Special structures. Past, present, and future. *Journal of Structural Engineering*. 2002(June):691–701.

14. Adriaenssens S, Block Ph, Veenendaal D. *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Routledge; 2014.

15. Krivoshapko SN. Step into the III millennium: architecture of shells and strength analysis of thin-walled building and engineering structures of complex shape. *Installation and special work in construction*. 2001;(8–9):2–5.

#### For citation

Gil-oulbé M, Markovich AS, Ngandu P, Anosova SV. Geometric nonlinear analysis of thin elastic paraboloid of revolution shaped shells with radial waves. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(3):208–214. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-3-208-214>

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-3-208-214

Научная статья

## Геометрически нелинейный расчет тонких упругих оболочек в форме параболоида вращения с радиальными волнами

М. Жиль-улбе, А.С. Маркович, П. Нганду, С.В. Аносова

Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

#### История статьи:

Потупила в редакцию: 28 июля 2020 г.

Доработана: 13 августа 2020 г.

Принята к публикации: 22 сентября 2020 г.

#### Ключевые слова:

параболоид вращения с радиальными волнами, материальная нелинейность, контактная нелинейность, нелинейность граничных условий, тонкая оболочка

*Аннотация.* Древние крыши и купола привлекают особое внимание, благодаря разнообразию форм оболочек. Оболочка – это конструкция, состоящая из листового материала, ее кривизна играет важную роль в конструктивном поведении, реализуя пространственную форму. Существуют два типа оболочек: толстые и тонкие. Г. Бранков, С.Н. Кривошапко, В.Н. Иванов и В.А. Романова провели интересные исследования параболоидных оболочек в форме зонтичных и зонтичного типа поверхностей. К данной конструкции, подвергающейся изменению жесткости в ее нагруженном состоянии, применим термин «нелинейный». Существует три основных типа нелинейностей: геометрическая, материальная и контактная (нелинейность граничных условий). В качестве объекта исследования для определения напряженно-деформированного состояния был выбран параболоид с внутренним радиусом 4 м, внешним радиусом 20 м и числом волн, равным 6. Тестовая оболочка изготавливалась из железобетона. Параметр минимальной нагрузки, при котором оболочка теряет стабильность, показал запас более чем в три раза.

#### Для цитирования

Gil-oulbé M., Markovich A.S., Ngandu P., Anosova S.V. Geometric nonlinear analysis of thin elastic paraboloid of revolution shaped shells with radial waves // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 208–214. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-3-208-214>

*Жиль-улбе Матве*, доцент департамента строительства Инженерной академии РУДН; кандидат технических наук; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0057-3485>, eLIBRARY Author ID: 2726-1171.

*Маркович Алексей Семенович*, доцент департамента строительства Инженерной академии РУДН; кандидат технических наук; eLIBRARY Author ID: 28379821; [markovich-as@rudn.ru](mailto:markovich-as@rudn.ru)

*Нганду Проспер*, магистрант департамента строительства Инженерной академии РУДН.

*Аносова Светлана Вячеславовна*, магистрант департамента строительства Инженерной академии РУДН.



