



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

**Том 18 № 3 (2017)**

**DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3**

**<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**, директор Инженерной академии РУДН, директор департамента механики и мехатроники Инженерной академии РУДН, доктор технических наук, профессор

**Заместитель главного редактора**

**Резник Сергей Валерьевич**, заведующий кафедрой НУК «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана, доктор технических наук, профессор

**Ответственный секретарь**

**Ткаченко Ирина Михайловна**, доцент департамента механики и мехатроники Инженерной академии РУДН, кандидат технических наук

**Члены редакционной коллегии**

**Алифанов О.М.** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой космических систем и ракетостроения МАИ, член-корреспондент РАН

**Агравал Бридж** — Навал Постградуейт Скул, профессор, Монтерей, США

**Галишичкова В.В.** — доктор технических наук, доцент, директор департамента архитектуры и строительства Инженерной академии РУДН

**Анна Герман** — Университет Бейры Интериор, профессор, Португалия

**Дивеев А.И.** — доктор технических наук, профессор, заведующий сектором проблем кибернетики ФИЦ ИУ РАН

**Захаров В.Н.** — доктор технических наук, профессор, директор Института проблем комплексного освоения недр РАН, член-корреспондент РАН

**Хоуэлл Кэтлин** — Университет Пердью, профессор, США

**Калугин В.Т.** — доктор технических наук, профессор, декан НУК «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана

**Коноплев В.Н.** — доктор технических наук, профессор, профессор департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН

**Корнилова А.В.** — доктор технических наук, доцент, профессор департамента архитектуры и строительства Инженерной академии РУДН

**Мальшев В.В.** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой системного анализа МАИ

**Мисра Арун** — Университет МакГилл, профессор, Канада

**Мортари Даниэль** — Техасский университет А&М, профессор, США

**Омельченко И.Н.** — доктор технических наук, доктор экономических наук, профессор, декан НУК «Инженерный бизнес и менеджмент» МГТУ им. Н.Э. Баумана

**Попов Г.А.** — доктор технических наук, профессор, академик РАН, директор НИИ Прикладной механики и электродинамики МАИ

**Рыльникова М.В.** — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем комплексного освоения недр РАН

**Спенсер Дэвид** — Университет Пенн Стейт, профессор, США

**Фомин В.М.** — доктор технических наук, профессор, профессор МАМИ

**Филиппо Грациани** — Римский университет «Ла Сапиенца», профессор, Италия

**Фурфаро Роберто** — Университет Аризоны, профессор, США

**Варатараджу Ренугант** — Университет Путра Малайзия, профессор, Малайзия

**Ясакэ Тетсуо** — Университет Кюсю, профессор Эмеритус, Япония

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

ISSN 2312-8151 (online); ISSN 2312-8143 (print)

4 выпуска в год.

Входит в перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ.

Включен в каталог периодических изданий Ульрих (Ulrich's Periodicals Directory:  
<http://www.ulrichsweb.com>).

Языки: русский, английский, французский, немецкий, испанский.

Материалы журнала размещаются на платформах РИНЦ Российской научной электронной библиотеки, Electronic Journals Library Cyberleninka.

### **Цель и тематика**

Ежеквартальный научный рецензируемый журнал «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования» издается Российским университетом дружбы народов с 2000 года.

**Цель журнала** — публикация результатов исследований ученых Инженерной академии РУДН и их коллег по проблемам строительства, архитектуры, машиностроения, геологии, горного дела.

Журнал адресован научным работникам, инженерам, аспирантам и студентам по соответствующим направлениям научных исследований.

### **Основные тематические разделы:**

Инновационные программы инженерных исследований;  
Машиностроение и энергомашиностроение;  
Инновационное недропользование;  
Актуальные вопросы технологий строительных процессов;  
Кибернетика и мехатроника;  
Рецензии.

---

Редактор: *М.П. Малахов*  
Компьютерная верстка: *О.Г. Горюнова*

**Адрес редакции:**  
ул. Орджоникидзе, д. 3, Москва, Россия, 115419  
Тел.: (495) 955-07-16; e-mail: [ipk@rudn.university](mailto:ipk@rudn.university)

**Адрес редакционной коллегии серии «Инженерные исследования»:**  
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419  
Тел.: (495) 955-07-92; e-mail: [engjournalrudn@rudn.university](mailto:engjournalrudn@rudn.university)

---

Подписано в печать 15.10.2017. Выход в свет 30.10.2017. Формат 70×100/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «NewtonС».  
Усл. печ. л. 8,71. Тираж 500 экз. Заказ № 804. Цена свободная.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Российский университет дружбы народов» (РУДН)  
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Отпечатано в типографии ИПК РУДН  
115419, Москва, Россия, ул. Орджоникидзе, д. 3, тел. (495) 952-04-41; e-mail: [ipk@rudn.university](mailto:ipk@rudn.university)



## RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCHES

VOLUME 18 NUMBER 3 (2017)

DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3

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

Founded in 2000

Founder: PEOPLES' FRIENDSHIP UNIVERSITY OF RUSSIA

---

### EDITOR-IN-CHIEF

*Razumny Yu.N.*, the Director of the Academy of Engineering of RUDN, Director of the Department of mechanics and mechatronics of the Academy of Engineering of RUDN, Professor

### ASSOCIATE EDITOR-IN-CHIEF

*Reznik S.V.*, the Head of the Department of "Special Engineering" MSTU. N.E. Bauman, Professor

### ASSISTANT TO THE EDITOR-IN-CHIEF

*Tkachenko I.M.*, associate Professor, Department of mechanics and mechatronics of the Academy of Engineering of RUDN

### EDITORIAL BOARD

*Alifanov O.M.* — the Head of the Department of Space Systems and Missile Design, MAI, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor

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

*Galishnikova V.V.* — the Director of the Architecture and Construction Department of the Academy of Engineering of RUDN, Associate Professor

*Guerman Anna* — Universidade da Beira Interior, Portugal, Professor

*Diveev A.I.* — the Head of the sector of problems of cybernetics of Federal Research Center "Informatics and Control" of the Russian Academy of Sciences, Professor

*Zaharov V.N.* — the Director of the Institute for Problems of Integrated Development of the Subsurface of the Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor

*Howell Kathleen* — Purdue University, USA, Professor

*Kalugin V.T.* — the Dean of the "Special Engineering" MSTU. N.E. Bauman, Professor

*Konoplev V.N.* — Professor of the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering of the RUDN of Academy of Engineering, Professor

*Kornilova A.V.* — Professor of the Department of Architecture and Construction of the Academy of Engineering of RUDN, Associate Professor

*Malyshev V.V.* — the Head of the Department of System Analysis MAI, Professor

*Misra Arun* — McGill University, Canada, Professor

*Mortari Daniele* — Texas A&M University, USA, Professor

*Omelchenko I.N.* — the Dean of the "Engineering business and management" MSTU. N.E. Bauman, Professor

*Popov H.A.* — the Director of the Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics MAI, Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor

*Rylnikova M.V.* — the Chief Researcher of the Institute for Problems of Integrated Development of the Subsurface of the Russian Academy of Sciences, Professor

*Spencer David* — Penn State University, USA, Professor

*Fomin V.M.* — Professor MAMI, Professor

*Filippo Graziani* — University Roma "La Sapienza", Italy, Professor

*Furfaro Roberto* — University of Arizona, USA, Professor

*Varatharajoo Renuganth* — University Putra Malaysia, Malaysia, Professor

*Yasaka Tetsuo* — Kyushu University, Japan, Professor Emeritus

**RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCHES.**  
**Published by the Peoples' Friendship University of Russia, Moscow**

ISSN 2312-8151 (online); ISSN 2312-8143 (print)

4 issues per year.

Languages: Russian, English, French, German, Spanish.

Indexed in Ulrich's Periodicals Directory: <http://www.ulrichsweb.com>

**Aim and Scope**

The quarterly scientific reviewed journal RUDN Journal of Engineering Researches Is published by the Peoples' Friendship University of Russia since 2000.

**The purpose of the journal** — is the publication of research results of scientists of the Engineering academy of RUDN University, and their colleagues on the problems of civil engineering, architecture, mechanical engineering, geology, mining engineering.

The journal is addressed to scientists, engineers, graduate students and students on corresponding directions of scientific research.

**Main thematic sections:**

Innovative software engineering research;  
Mechanical engineering and power-plant;  
Innovative use of mineral resources;  
Actual technology of construction processes;  
Cybernetics and mechatronics;  
Reviews.

---

Editor *M.P. Malakhov*

Computer design: *O.G. Gorunova*

**Address of the editorial board:**

Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419

Ph. +7 (495) 955-07-16; e-mail: [ipk@rudn.university](mailto:ipk@rudn.university)

**Address of the editorial board Series "Engineering researches":**

Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419

Ph. +7 (495) 955-07-92;

e-mail: [engjournalrudn@rudn.university](mailto:engjournalrudn@rudn.university)

---

Printing run 500 copies. Open price.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
"Peoples' Friendship University of Russia"

6 Miklukho-Maklaya str., 117198 Moscow, Russia

**Printed at RUDN Publishing House:**

3 Ordzhonikidze str., 115419 Moscow, Russia,

Ph. +7 (495) 952-04-41; e-mail: [ipk@rudn.university](mailto:ipk@rudn.university)

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ И ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЕ

- Виноградов Л.В., Мамаев В.К., Ощепков П.П.** Турбинный профиль АЗК7 — НАСА: автоматизация проектирования ..... 299
- Новиков А.Д., Просунцов П.В., Резник С.В.** Определение конструктивного облика рефлектора зеркальной космической антенны из композиционного материала ..... 308
- Нехороших Г.Е.** Опыт применения полимерных пленочных материалов в конструкции криооленного разгонного блока «12 КРБ» ..... 318

### ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

- Балджиев Р.С., Алексеев А.А., Просунцов П.В.** Моделирование теплообмена в гибких проводниках галогенных ламп стенда тепловых испытаний ..... 325
- Смирнов С.В., Макаров А.Р., Воробьев А.А.** Математическое моделирование динамики движения юбки поршня в цилиндре двигателя внутреннего сгорания ..... 338

### ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОГРАММЫ ИНЖЕНЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

- Резник С.В., Просунцов П.В., Денисов О.В., Петров Н.М., Вонхеонг Ли.** Расчетно-экспериментальная методика определения теплопроводности композиционного материала корпуса наноспутника ..... 345
- Кайлачаков П.Э.** Сульфидная минерализация руд уран-молибден-ренийевого Брикетно-Желтухинского месторождения (Подмосковный бассейн) ..... 353
- Михайловский К.В., Городецкий М.А.** Разработка методики определения и коррекции параметров рабочей орбиты космического аппарата дистанционного зондирования земли ..... 361

### ТОЧКА ЗРЕНИЯ

- Ходоровский А.З., Назаров А.В.** Анализ быстродействия разветвляющихся АЦП время-импульсного типа с системой грубо-точного отсчета ..... 373
- Dopudja D.** Appendix to the classification of rural settlements in the republic of serbia according to their urban-morphological characteristics (Приложение к классификации сельских поселений в республике Сербии по морфологическим характеристикам) ..... 382

### ИННОВАЦИОННОЕ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

- Малюков В.П., Старовойтова Ю.И.** Флотационные процессы при строительстве выработок-емкостей методом подземного растворения каменной соли с большим содержанием газа.... 391

## CONTENTS

### MECHANICAL ENGINEERING AND POWER-PLANT

- Vinogradov L.V., Mamaev V.K., Oschepkov P.P.** Cad of turbine profile type A3K7 NACA by the method of nonlinear transformation..... 299
- Novikov A.D., Prosuntsov P.V., Reznik S.V.** Mirror space antenna reflector made of composite materials constructive appearance determination ..... 308
- Nekhorosikh G.E.** Experience of application of polymeric pellicle materials in construction of criogenic starting block «КРБ-12» ..... 318

### THEORY AND PRACTICE

- Baldzhiev R.S., Alekseyev A.A., Prosuntsov P.V.** Modeling of heat exchange in flexible conductors of halogen lamps of thermal test facility..... 325
- Smirnov S.V., Makarov A.R., Vorobyev A.A.** Mathematical modeling of dynamics movement of a piston skirt in the cylinder of the internal combustion engine..... 338

### INNOVATIVE SOFTWARE ENGINEERING RESEARCH

- Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Denisov O.V., Petrov N.M., Vonheong Lee.** Nanosatellite body composite material thermal conductivity determination computational and theoretical method..... 345
- Kaylachakov P.E.** Sulfide ore mineralization of the uranium-molybdenum-rhenium Briketno-Zheltukhinskoe deposit (Moscow basin) ..... 353
- Mikhaylovskiy K.V., Gorodetsky M.A.** Development of method for determining and correcting parameters of the working orbit of the earth remote sensing satellite ..... 361

### POINT OF VIEW

- Hodorovsky A.Z., Nazarov A.V.** Analysis of performance a scanning analog-digital con-verter of the “time-impulse” type with a coarsely-accurate system of a counting ..... 373
- Dopudja D.** Appendix to the classification of rural settlements in the republic of serbia according to their urban-morphological characteristics ..... 382

### INNOVATIVE USE OF MINERAL RESOURCES

- Malyukov V.P., Starovoytova Y.I.** Flotation processes during the construction workings-tanks by underground dissolution of rock salt with a high content of gas ..... 391



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-299-307

УДК 621.165.533

## ТУРБИННЫЙ ПРОФИЛЬ АЗК7 — НАСА: АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Л.В. Виноградов, В.К. Мамаев, П.П. Ощепков

Российский университет дружбы народов  
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

В работе представлены результаты проектирования турбинного реактивного профиля типа АЗК7 с использованием САПР, реализующей метод нелинейных преобразований. Авторами применено преобразование Гирста. Все вычисления и построения выполнены в интегрированном математическом пакете *Mathcad*. Для вычислений и построений средняя линия, заданная координатным способом, аппроксимируется двумя отрезками прямых в области входной и выходной кромок с заданными углами наклона и тремя криволинейными участками в виде дуг кривых Безье 2-го порядка. Координаты точек сопряжения соседних аппроксимируемых участков определяются итерационным методом с оптимизацией индекса корреляции. Для определения координат точки перегиба использовалось условие равенства нулю второй производной интерполяционного обвода профиля. В работе определены координаты точки сопряжения входной кромки в виде дуги окружности и серии точек обвода контура, аппроксимированной кривой Безье 2-го порядка. Определив начальную и конечную опорные точки параболы Безье 2-го порядка, определялись координаты промежуточной опорной точки на пересечении касательных, исходящих из начальной и конечной опорных точек. После аппроксимации трех участков кривыми Безье 2-го порядка было записано интегральное уравнение обвода спинки (выпуклой части контура) профиля АЗК7 с учетом того, что входная и выходная кромки выполнены в виде дуг окружностей.

**Ключевые слова:** турбина, профиль, САПР, нелинейные преобразования

В НАСА был разработан турбинный реактивный профиль (серия АЗК7), для построения которого задана координатным способом форма средней линии изогнутого профиля и исходный симметричный профиль, толщина которого наращивается на среднюю линию. (Это один из возможных вариантов проектирования турбинных профилей осевых машин [5].) Толщина профиля приводится в зависимости от расстояния вдоль хорды, однако, если средняя линия имеет значительную кривизну (при большом угле поворота потока), т.е. если длина средней линии на 30% превышает длину хорды, распределение толщины дается обычно вдоль средней линии [2].

В работе применено преобразование Гирста  $I_2$  с несобственным центром  $F_1^\infty$  [3]. У рассматриваемой специализации кремоновых инволюций  $I_n$  с несобственным центром  $F_1^\infty$  есть очень важное метрическое свойство: такое преобразование является эквиформным, т.е. сохраняют площади преобразованного и исходного образов.

В использованной в данной работе специализации квадратичной инволюции  $I_2$ , инвариантной коникой является серия квадратичных парабол  $d^2$  в виде кривых *Bezier* 2-го порядка.

Прообразом турбинного изогнутого профиля является симметричный исходный турбинный профиль *A3K7* [2], аэродинамические характеристики которого известны из экспериментальных данных.

Все вычисления и построения выполнены в интегрированном математическом пакете *Mathcad*, для чего была разработана система автоматизированного проектирования (САПР), включающая ряд ранее разработанных программный модулей.

Объектом конструирования был профиль серии *A3K7* [1] симметричный, с максимальной относительной толщиной 20%, хордой профиля 100 мм, относительная абсцисса сечения с максимальной толщиной — 20%, радиус входной кромки  $r_1 = 4,407\%$  от хорды, радиус выходной кромки  $r_2 = 1\%$  от хорды. Важно отметить, что *NACA* определяет входной и выходной углы (тангенсы углов) установки лопатки не на входной и выходной кромках, а на расстояниях 0,5 и 95% от длины хорды [2]. (Как указывалось ранее, заданы координаты средней линии в процентах от хорды.)

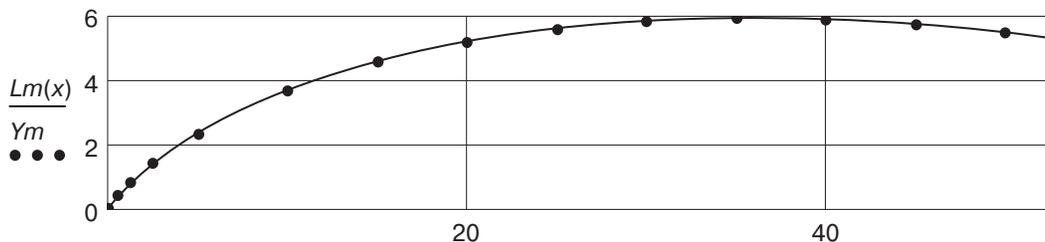
В таблице 1 приведена матрица координат средней линии профиля, где первая, третья, пятая строки — абсциссы, вторая, четвертая, шестая — ординаты. (Матрица координат параллельно записывается в текстовый структурированный файл для возможности последующего ее использования в других средах.)

Таблица 1

**Матрица координат средней линии турбинного реактивного профиля *A3K7***

$$\begin{pmatrix} 0 & 0,5 & 1,25 & 2,5 & 5,0 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 \\ 0 & 0,4287 & 0,836 & 1,428 & 2,359 & 3,689 & 4,597 & 5,217 & 5,623 & 5,852 \\ 35 & 40 & 45 & 50 & 55 & 60 & 65 & 70 & 75 \\ 5,936 & 5,897 & 5,753 & 5,516 & 5,200 & 4,814 & 4,387 & 3,870 & 3,328 \\ 80 & 85 & 90 & 96 & 100 \\ 2,746 & 2,183 & 1,485 & 0,801 & 0 \end{pmatrix}.$$

На рисунке 1 показан фрагмент векторного графика средней линии в исходной системе координат. График строится для получения первичного образа объекта проектирования и контроля корректности исходных данных и их ввода.



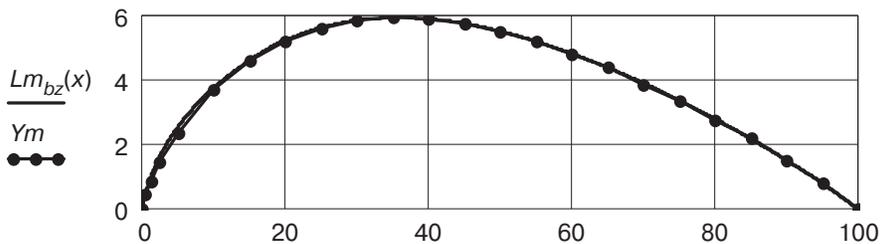
**Рис. 1.** Векторный график (фрагмент) средней линии профиля турбинного *A3K7* (*NACA*):  
 — интерполяция средней линии кубическим сплайном; ••• — точки средней линии, координаты которых заданы (векторный график средней линии)

Для последующих вычислений и построений средняя линия, заданная координатным способом, аппроксимируется двумя отрезками прямых в области входной и выходной кромок с заданными углами наклона и тремя криволинейными участками в виде дуг кривых Безье 2-го порядка. Координаты точек сопряжения соседних аппроксимируемых участков определяются итерационным методом с оптимизацией индекса корреляции (максимальное значение) [4]. Для вычисления индекса корреляции в *Mathcad* имеется специальная функция, что существенно сокращает время вычислений.

Следует отметить, что полученное уравнение аппроксимированной средней линии имеет аналитический формат, что дает возможность применять цифровую технологию не зависимо от языка программирования и соответствует современным технологиям при проектировании инженерных объектов. Интегральное уравнение средней линии имеет вид (формат *Mathcad*)

$$Lm_{bz}(x) := \begin{cases} T_{vx}(x) & \text{if } 0 < x \leq 0,5 \\ Yx_{bz}(x) & \text{if } 0,5 < x \leq Xm_7 \\ Y2'_{bz}(x) & \text{if } Xm_7 < x \leq Xm_{14} \\ Y3'_{bz}(x) & \text{if } Xm_{14} < x \leq Xm_{22} \\ T_{vux}(x) & \text{if } Xm_{22} < x \leq Xm_{23} \end{cases} \quad (1)$$

На рисунке 2 показана исходная средняя линия в виде интерполяционного графика и средняя линия, построенная по интегральному уравнению (1).



**Рис. 2.** Средняя линия профиля АЗК7: ••• — исходные точки, заданные координатным способом; — — аппроксимированная средняя линии, построенная по формуле (1)

Рассчитанный индекс корреляции между исходным вектором значений и аппроксимированными равен  $corr = 0,999723$ . С практической точки точность аппроксимации близка к точности округления исходных данных. (В сложных случаях для лучшего приближения исходных и аппроксимированных данных можно увеличить количество участков аппроксимации.)

Следующим этапом проектирования было построение исходного симметричного профиля, заданного распределением толщины профиля по длине хорды.

В таблице 2 представлена матрица координат обводов симметричного исходного профиля АЗК7.

Для оценки корректности исходных данных был построен векторный график исходного профиля и интерполяционный вариант (рис. 3).

Таблица 2

Распределение толщины профиля (абсциссы и ординаты в процентах от хорды)

$$\left( \begin{array}{cccccccccccc} 0 & 1,25 & 2,5 & 5,0 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 \\ 0 & 3,469 & 4,972 & 6,918 & 9,007 & 9,827 & 10,00 & 9,899 & 9,613 & 9,106 & 8,594 \end{array} \right) \cdot$$

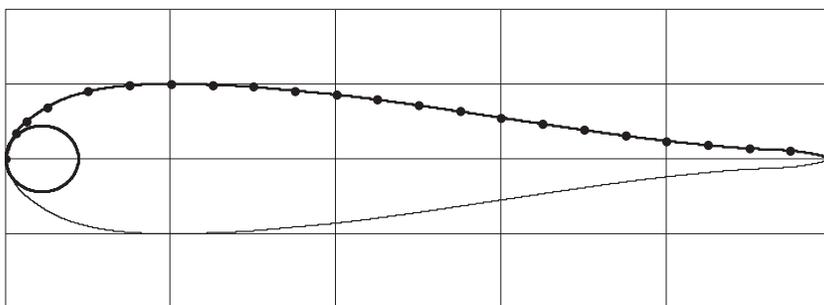
$$\left( \begin{array}{cccccccccccc} 45 & 50 & 55 & 60 & 65 & 70 & 75 & 80 & 85 & 90 & 95 & 100 \\ 7,913 & 7,152 & 6,339 & 5,500 & 4,661 & 3,848 & 3,087 & 2,406 & 1,830 & 1,387 & 1,101 & 0 \end{array} \right) \cdot$$


Рис. 3. Векторный график исходного турбинного профиля AZK7:

••• — исходные точки обводов профиля; — — интерполяция исходных данных кубическим сплайном

Как отмечалось ранее входная и выходная кромки профиля оформлены в виде дуг окружностей соответствующих радиусов. Как можно видеть из графика (см. рис. 3), в области выходной кромки имеется особенность обвода профиля — перегиб контура. Эту особенность следует учесть при аппроксимации профиля кривыми Безье 2-го порядка. Для определения координат точки перегиба использовалось условие равенства нулю второй производной интерполяционного обвода профиля. На рисунке 4 в формате *Mathcad* показан фрагмент алгоритма решения для точки перегиба контура.

Определение координат точки перегиба обвода спинки профиля

$$x := 60$$

$$X_{pg} := \text{root} \left( \frac{d^2}{dx^2} Lc(x), x \right)$$

$$X_{pg} = 60,152$$

Рис. 4. Фрагмент программы для определения абсциссы точки перегиба контура (формат *Mathcad*)

Следующим этапом проектирования является определение координат точки сопряжения входной кромки в виде дуги окружности и серии точек обвода контура, аппроксимированной кривой Безье 2-го порядка. Итерационным способом, варьируя абсциссу начальной точки на дуге окружности и задавая конечную точку вектора аппроксимации, при условии максимума индекса корреляции  $corr_{\max}$  были найдены координаты начальной опорной точки *A* кривой Безье для про-

филя АЗК7. Продолжение этого этапа — процедура максимального увеличения интервала аппроксимации для сокращения участков аппроксимации обводов при условии максимума индекса корреляции.

Для первого участка аппроксимации абсцисса начальной опорной точки равна  $X_{Ac} = 0,3$  мм. Конечной точкой первого участка аппроксимации была точка с абсциссой равной 20 мм. Определив начальную и конечную опорные точки параболы Безье 2-го порядка, определялись координаты промежуточной опорной точки на пересечении касательных, исходящих из начальной и конечной опорных точек. (Следует напомнить, что координаты опорных точек: начальной, средней и конечной, являются коэффициентами параметрических уравнений кривой Безье.)

Расчеты для первого аппроксимационного участка показали, что индекс корреляции равен  $corr = 0,999931$ .

Для решения второго участка аппроксимации характеристика начальной опорной точки известна, так как эта точка есть конечная опорная точка предыдущего участка. Поэтому следует только тем же методом найти конечную опорную точку второго (последующего) участка. Для второго участка были получены следующие данные: абсцисса начальной опорной точки 20 мм, конечной опорной точки — 60 мм, индекс корреляции —  $corr = 0,99969$ .

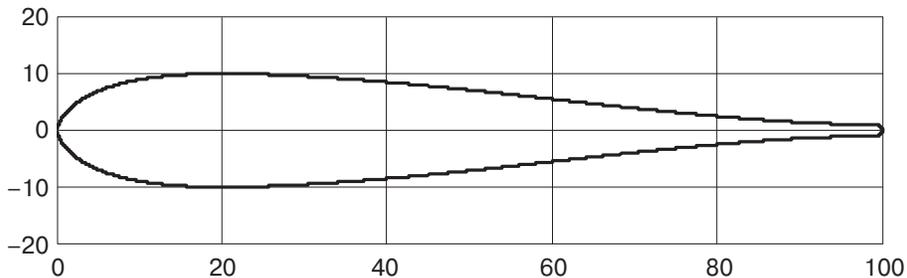
Третий участок аппроксимации. Особенность аппроксимации третьего участка заключается в том, что необходимо определить характеристики конечной опорной точки. Для заданного профиля конечной опорной точкой были координаты экстремальной точки дуги окружности выходной кромки с абсциссой равной  $X_c = (b - r_2)$  и ординатой  $r_2$ . Дополнительным условием для конечной точки было условие параллельности оси абсцисс исходной системы координат касательной, исходящей из конечной точки. При этих условиях можно построить характеристический треугольник для аппроксимирующей кривой Безье 2-го порядка. Для третьего участка аппроксимации индекс корреляции был получен равным  $corr = 0,99981$ .

После аппроксимации трех участков кривыми Безье 2-го порядка было записано интегральное уравнение обвода спинки (выпуклой части контура) профиля АЗК7с учетом того, что входная и выходная кромки выполнены в виде дуг окружностей. Спинка симметричного исходного профиля в аналитическом виде в формате *Mathcad* описывается интегральным уравнением

$$Lm_{bz}(x) := \begin{cases} T_{vx}(x) & \text{if } 0 < x \leq 0,5 \\ Yx_{bz}(x) & \text{if } 0,5 < x \leq Xm_7 \\ Y2'_{bz}(x) & \text{if } Xm_7 < x \leq Xm_{14} \\ Y3'_{bz}(x) & \text{if } Xm_{14} < x \leq Xm_{22} \\ T_{vux}(x) & \text{if } Xm_{22} < x \leq Xm_{23} \end{cases} \quad (2)$$

В силу симметричности обводов профиля, уравнение вогнутой части профиля (корытца) может быть записано тем же уравнением что и спинка, но со знаком минус.

На рисунке 5 показан симметричный исходный профиль *A3K7* в исходной системе координат, построенный по аппроксимационному интегральному уравнению (2).



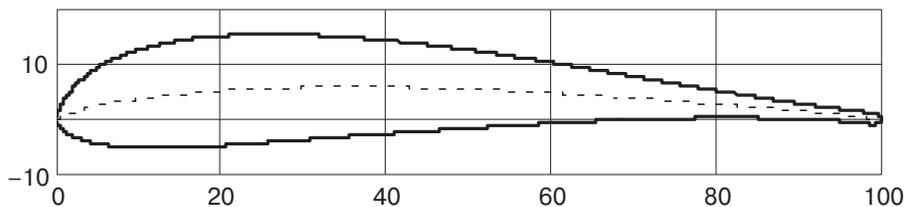
**Рис. 5.** Симметричный исходный профиль *A3K7*, построенный по аппроксимационному аналитическому уравнению

Как указано ранее, изогнутый турбинный реактивный профиль на базе профиля *A3K7*, проектируется методом нелинейных преобразований, где прообразом служит симметричный профиль, инвариантной кривой средняя линия, образом — изогнутый профиль. Для построения изогнутого профиля были получена система уравнений преобразования:

$$S_{NLa3k7}(x) := Lm_{bz}(x) + SA3K7_{app}(x);$$

$$W_{NLa3k7}(x) := Lm_{bz}(x) + WA3K7_{app}(x). \quad (3)$$

На рисунке 6 показан изогнутый турбинный реактивный профиль серии *A3K7* *NACA* с углом поворота потока  $50^\circ$ , построенный на базе симметричного исходного профиля и средней линии методом нелинейных преобразований Гирста с несобственным центром.



**Рис. 6.** Изогнутый турбинный реактивный профиль серии *A3K7* *NACA* с углом поворота потока  $50^\circ$

Полученная аналитическая форма описания обводов симметричного и изогнутого профилей серии *A3K7* позволяет аналитически рассчитать все геометрические характеристики, необходимые при расчете на прочность лопатки, формируемых профилями каналов решетки и др. Как указывалось ранее, примененный нелинейный метод обладает свойством эквивормности, т.е. площади исходного симметричного профиля и изогнутого профиля равны. Для сконструированного профиля площади оказались равными  $F = 1,199 \cdot 10^3 \text{ мм}^2$ .

Проведенная работа позволяет сделать следующие выводы.

1. Разработана система автоматизированного проектирования, которая позволяет проектировать турбинный реактивный профиль серии АЗК7.
2. Предложенная форма описания обводов профиля дает возможность аналитически исследовать весь комплекс геометрических параметров профиля, строить решетки в других программах и на других языках.
4. Разработанная САПР позволяет автоматически варьировать параметры профиля и решетки: геометрический масштаб, угол изгиба профиля, угол установки профиля в решетке, относительный шаг решетки и др.
5. САПР выполнена по модульной схеме, что делает систему модернизационно пригодной: совершенствование системы, дополнение ее новыми модулями встраивание системы в другие САПР более высокого уровня, например, в САПР «Турбина» и др.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Холщевников К.В.* Теория и расчет авиационных лопаточных машин. М.: Машиностроение, 1970. 610 с.
- [2] *Хорлок Дж.Х.* Осевые турбины (газовая динамика). М.: Машиностроение, 1972. 208 с.
- [3] *Иванов Г.С.* Конструирование технических поверхностей (математическое моделирование на основе нелинейных преобразований). М.: Машиностроение, 1987. 192 с.
- [4] Статистические методы обработки эмпирических данных / Рекомендации ВНИИНМАШ. М.: Изд-во стандартов, 1978. 230 с.
- [5] *Гусаков С.В., Патрахальцев Н.Н.* Планирование, проведение и обработка данных экспериментальных исследований двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие. М.: Изд-во РУДН, 2004. 167 с.

© Виноградов Л.В., Мамаев В.К., Ошечков П.П., 2017

#### История статьи:

Дата поступления в редакцию: июнь 2017

Дата принятия к печати: сентябрь 2017

#### Для цитирования:

**Виноградов Л.В., Мамаев В.К., Ошечков П.П.** Турбинный профиль АЗК7 — НАСА автоматизация проектирования // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: «Инженерные исследования»*. 2017. Т. 18. № 3. С. 299—307. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-299-307

#### Сведения об авторах:

*Виноградов Леонид Валерьевич*, кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер департамента машиностроения и приборостроения инженерной академии РУДН. *Сфера научных интересов*: системы автоматизированного проектирования, турбины, агрегаты турбонаддува. *Контактная информация*: e-mail: vinogradov\_lv@rudn.university

*Мамаев Владимир Константинович*, старший преподаватель департамента машиностроения и приборостроения инженерной академии РУДН. *Сфера научных интересов*: системы автоматизированного проектирования, турбины, акустические и волновые процессы. *Контактная информация*: e-mail: mamaev\_vk@rudn.university

*Ощепков Петр Платонович*, кандидат технических наук, доцент департамента машиностроения и приборостроения инженерной академии РУДН. *Сфера научных интересов:* системы автоматизированного проектирования, эксплуатация двигателей внутреннего сгорания, альтернативные топлива. *Контактная информация:* e-mail: oshchepkov\_pp@rudn.university

## **CAD OF TURBINE PROFILE TYPE A3K7 NACA BY THE METHOD OF NONLINEAR TRANSFORMATION**

**L.V. Vinogradov, V.K. Mamaev, P.P. Oschepkov**

Peoples' Friendship University of Russia  
*Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198*

The paper presents the results of designing a turbine profile type *A3K7 NACA* using CAD, which realizes the method of nonlinear transformation. Girst transformation was used by the authors. All calculations and graphical representations were made in the computer algebra system Mathcad. For the calculation and graphical representations the middle line, defined by coordinates, is approximated with two linear segments in the regions of the leading and tailing edges with specified angles and three nonlinear segments in the form of second order Bezier curves. The coordinates of the matching points of neighbor sections are calculated using an iterative method with an optimization of the correlation index. The coordinate of the bending point was found using the condition of equality to zero of the second derivative of the interpolative contour. The coordinates of the junction point of the leading edge are determined in the paper as ab arc and a series of points of the contour, approximated by a second order Bezier curve. After determining the first and last point of the second order Bezier curve, the coordinated of the middle point on the intersection of tangential lines that start at the first and last point of the curve. After the approximation of three sections with second order Bezier curves the integral function of the blade back (convex side of the contour) of the profile *A3K7* considering the leading and tailing edges are made as arcs.

**Key words:** turbine, computer-aided design, nonlinear transformation

### **REFERENCES**

- [1] Holshevnikov K.V. Theory and calculation of aircraft impeller machine. M.: Engineering, 1970. 610 p.
- [2] Horlock J.H. Axial flow turbine (gas dynamics). M.: Mashinostroenie, 1972. 208 p.
- [3] Ivanov G.S. Designing of technical surfaces (mathematical modelling on the basis of nonlinear transformations). M.: Mashinostroenie, 1987. 192 p.
- [4] Statistical methods for processing of empirical data. Recommendations VNIINMASH. M.: Publishing House of standards, 1978. 230 p.
- [5] Gusakov S.V., Patrahaltsev N.N. Planning, conducting and data processing of experimental researches of internal combustion engines: Textbook. allowance. M.: publishing house of PFUR, 2004. 167 p.

### **Article history:**

Received: June 2017

Accepted: September 2017

**For citation:**

**Vinogradov L.V., Mamaev V.K., Oschepkov P.P. (2017) Cad of turbine profile type A3K7 NACA by the method of nonlinear transformation. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(3), 299–307. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-299-307**

**Bio Note:**

*Vinogradov Leonid Valerievich*, Candidate of Technical Sciences, assistant professor of the Department of technology of mechanical engineering, machine tools and instruments at the Academy of Engineering of the Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests*: computer aided design systems, turbines and turbo machinery. *Contact information*: e-mail: vinogradov\_lv@rudn.university

*Mamaev Vladimir Konstantinovich*, senior professor of the the Department of technology of mechanical engineering, machine tools and instruments at the Academy of Engineering of the Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests*: computer aided design systems, turbines, acoustic and wave processes. *Contact information*: e-mail: mamaev\_vk@rudn.university

*Oshchepkov Petr Platonovich*, Candidate of Technical Sciences, assistant professor of the Department of technology of mechanical engineering, machine tools and instruments at the Academy of Engineering of the Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests*: computer aided design systems, internal combustion engines operation, alternative fuels. *Contact information*: e-mail: oshchepkov\_pp@rudn.university



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-308-317

УДК 629.783

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНОГО ОБЛИКА РЕФЛЕКТОРА ЗЕРКАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

А.Д. Новиков, П.В. Просунцов, С.В. Резник

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)  
2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, Москва, Россия, 105005

В данной статье описаны поисковые исследования оптимальных конструкторско-технологических решений сверхлегкого рефлектора зеркальной космической антенны из углепластика. Исследования включали в себя конечно-элементное моделирование температурного и напряженно-деформированного состояния рефлектора на геостационарной орбите. В результате сравнения результатов моделирования для ряда вариантов рефлектора выбрана конструкция, с минимальными значениями температурных перемещений и погонной плотности.

**Ключевые слова:** рефлектор зеркальной космической антенны, конечно-элементное моделирование, конструктивно-компоновочная схема, композиционный материал

Рефлекторы зеркальных космических антенн (РЗКА) диаметром до 3 м представляют собой параболические оболочки открытого профиля, основным конструкционным материалом которых служит углепластик. Современные тенденции в области развития систем космической связи указывают на необходимость снижения погонной плотности конструкции РЗКА до значений, не превышающих  $2 \text{ кг/м}^2$ , и увеличения рабочей частоты антенн, что, в свою очередь, повышает требования к размеростабильности. Так, для бортовой антенны межспутниковой связи, работающей на частоте 60 ГГц, соответствующие предельные отклонения профиля не должны превышать 0,1 мм.

Различные варианты РЗКА можно отнести к следующим конструктивно-компоновочным схемам: трехслойная с сотовым наполнителем, с кольцевым ободом, с реберным подкреплением, комбинированная.

Отличительная особенность трехслойных схем — наличие сотового наполнителя из алюминия или композиционных материалов (КМ) между оболочками из КМ, чаще всего из углепластика (рис. 1).

Данная схема обеспечивает высокую жесткость конструкции, но отличается сравнительно высокой погонной плотностью ( $2,29 \text{ кг/м}^2$  для РЗКА диаметром 1,2 м) [1].

В схеме с кольцевым ободом постоянной или переменной ширины одна из накрывающих обод сплошных или сетчатых поверхностей используется для отражения радиоволн (рис. 2).

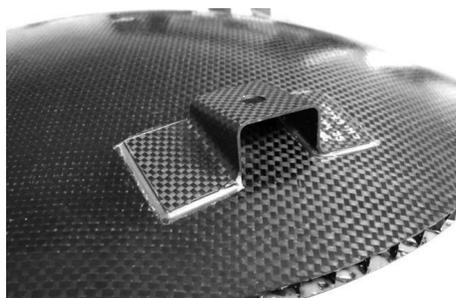
Созданные по этой схеме в HPS GmbH опытные модели РЗКА имеют диаметр 1,2 м. Антенна работает в Ku-/Ka-диапазонах. Масса конструкции составляет 4,3 кг, таким образом, погонная плотность превышает  $3,5 \text{ кг/м}^2$  [2], что больше значения конструкций с сотовым заполнителем.

Для повышения размеростабильности и снижения погонной плотности перспективным может быть использование конструкций с реберным подкреплением. Пример такого подхода — рефлектор, созданный в ЗАО «Пластик» (рис. 3) [3].

В МГТУ им. Н.Э. Баумана проводились работы по проектированию, изготовлению и испытанию рефлекторов с реберным подкреплением [4], результатом которых стал РЗКА с погонной плотностью  $2,5 \text{ кг/м}^2$  (рис. 4) [5–14].

Для снижения погонной плотности конструкции с реберным подкреплением необходимо оптимизировать геометрию расположения ребер, а также толщину элементов. Как было показано в работах [15; 16], схемы с подкреплением «пятиконечная звезда» и «шестиконечная звезда» (рис. 5) удовлетворяют требованиям, предъявляемым к конструкции РЗКА. Однако не были определены оптимальные значения геометрических характеристик: высоты ребер, толщины ребер, толщины оболочки.

Геометрические характеристики (табл. 1), использовались для проведения конечно-элементного моделирования температурного и напряженно-деформированного состояния конструкции рефлектора при функционировании на геостационарной орбите. Моделирование проводилось в программном пакете Siemens NX PLM Software с помощью решателей NX Nastran и Space System Analysis. Вариантам были присвоены условные обозначения (табл. 1).



**Рис. 1.** РЗКА трехслойной схемы с сотовым заполнителем из углепластика, HPS GmbH (Германия)



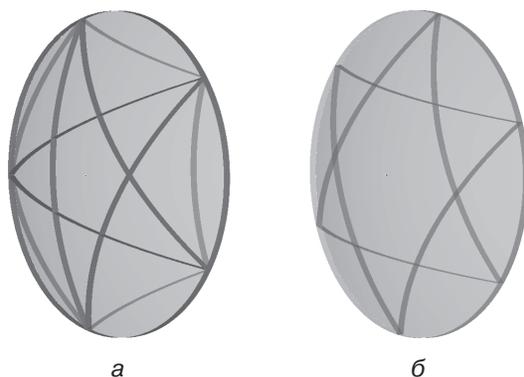
**Рис. 2.** Рефлектор с кольцевым ободом HPS GmbH (Германия)



**Рис. 3.** Экспериментальный РЗКА с радиальными и кольцевыми ребрами, ЗАО «Пластик» (Россия)



**Рис. 4.** Экспериментальный РЗКА с изогридной системой ребер, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Россия)



**Рис. 5.** Рефлекторы с реберным подкреплением по схеме: *а* — «пятиконечная звезда»; *б* — «шестиконечная звезда»

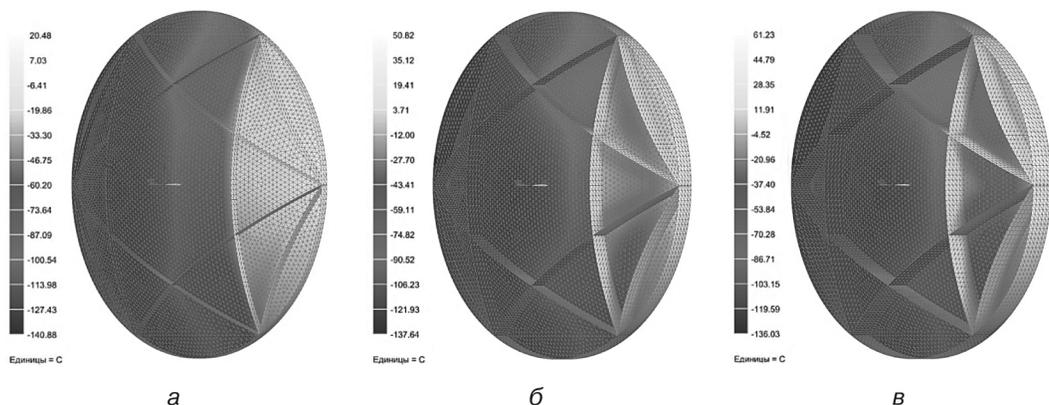
Таблица 1

**Вариации геометрических характеристик РЗКА**

Условное обозначение	Схема	Высота ребер, мм	Толщина ребер, мм	Толщина оболочки, мм
МР-6	Шестиконечная звезда	25	1,2	0,6
СР-6	Шестиконечная звезда	60	0,6	0,6
БР-6	Шестиконечная звезда	90	0,6	0,4
БР-5	Пятиконечная звезда	90	0,6	0,4
СР-5	Пятиконечная звезда	53	0,6	0,6

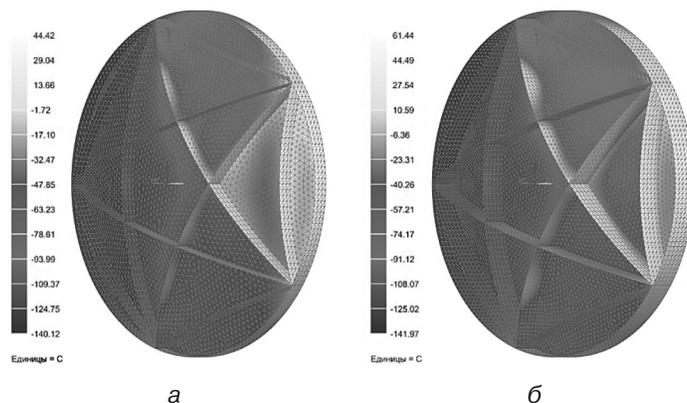
Геометрические характеристики выбирались из расчета подобной погонной массы для всех вариантов, не превосходящей  $1,7 \text{ кг/м}^2$ .

По итогам моделирования температурного состояния РЗКА при сравнительном анализе рассматривался момент, соответствующий повороту космического аппарата на  $150^\circ$  относительно оси Земля-Солнце, который характеризуется наибольшим перепадом температур при работе на геостационарной орбите. На рисунке 6 представлены распределения температур для трех вариантов геометрических характеристик схемы «шестиконечная звезда».



**Рис. 6.** Распределение температур по поверхности рефлектора с подкреплением по схеме «шестиконечная звезда» для вариантов: *а* — МР-6; *б* — СР-6; *в* — БР-6

На рисунке 7 представлены распределения температур для двух вариантов геометрических характеристик схемы «пятиконечная звезда».



**Рис. 7.** Распределение температур по поверхности рефлектора с подкреплением по схеме «шестиконечная звезда» для вариантов: а — СР-5; б — БР-5

В таблице 2 представлены результаты моделирования теплового состояния всех вариантов конструкций.

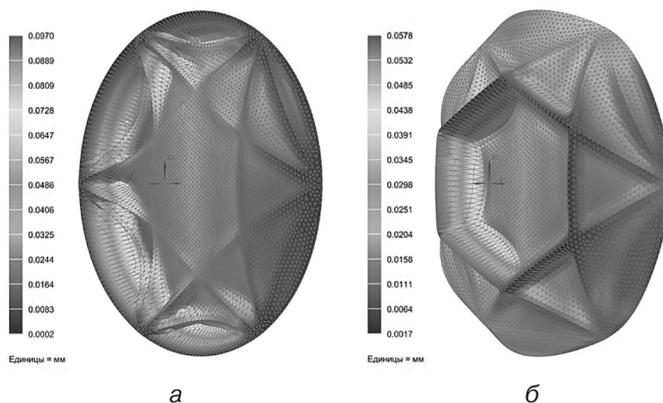
Таблица 2

**Распределение температур в схемах с оребрением «пятиконечная звезда» и «шестиконечная звезда»**

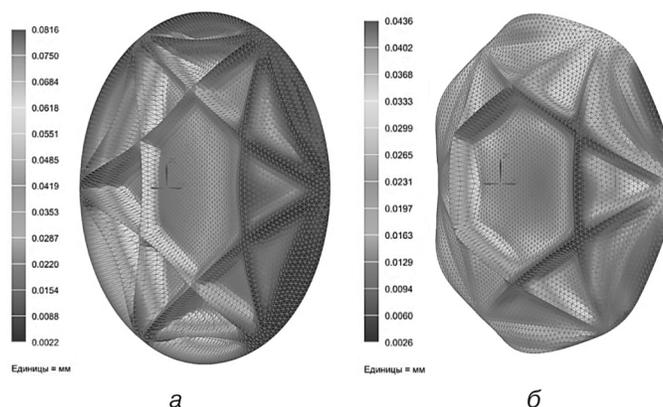
Условное обозначение варианта	Схема	Максимальная температура, °С	Минимальная температура, °С
МР-6	Шестиконечная звезда	20,48	-140,88
СР-6	Шестиконечная звезда	50,82	-137,64
БР-6	Шестиконечная звезда	61,23	-136,03
БР-5	Пятиконечная звезда	44,42	-140,12
СР-5	Пятиконечная звезда	61,44	-141,97

Данные теплового моделирования использовались как начальные условия для определения перемещений конструкций, вызванных нагревом поверхности. Для проведения моделирования напряженно-деформированного состояния необходимо определить метод закрепления РЗКА на борту космического аппарата. Установлено, что добиться наименьших перемещений конструкции возможно при закреплении рефлектора за внешний обод (круговое закрепление) и за внутренний многоугольник (центр).

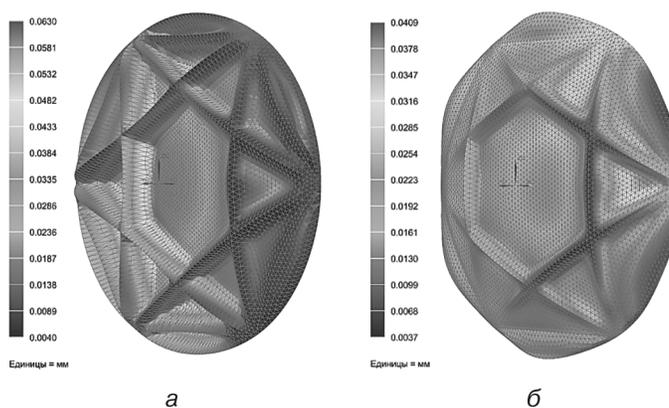
Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния рефлектора для схем «пятиконечная звезда» и «шестиконечная звезда» представлены на рисунках 8–12.



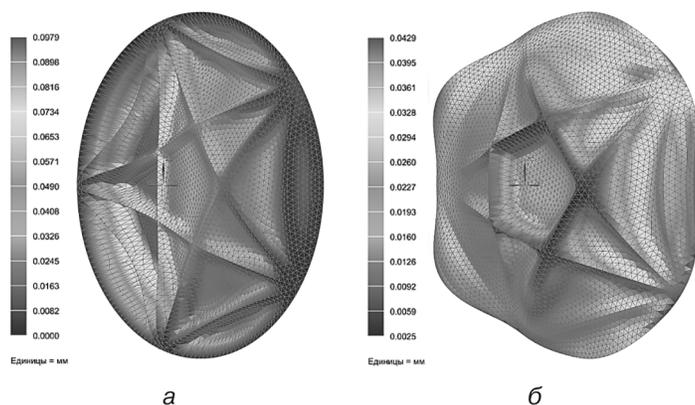
**Рис. 8.** Температурные перемещения варианта МР-6 с круговым закреплением (а) и закреплением в центре (б)



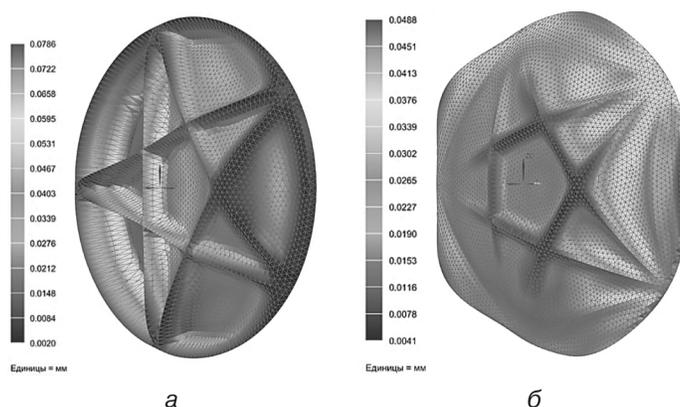
**Рис. 9.** Температурные перемещения варианта СР-6 с круговым закреплением (а) и закреплением в центре (б)



**Рис. 10.** Температурные перемещения варианта БР-6 с круговым закреплением (а) и закреплением в центре (б)



**Рис. 11.** Температурные перемещения варианта СР-5 с круговым закреплением (а) и закреплением в центре (б)



**Рис. 12.** Температурные перемещения варианта БР-5 с круговым закреплением (а) и закреплением в центре (б)

В таблице 3 представлены данные по температурным перемещениям всех вариантов схем «пятиконечная звезда» и «шестиконечная звезда».

Таблица 3

**Температурные перемещения различных схем и вариантов**

Условное обозначение варианта	Закрепление	Перемещения, мм
БР-6	Круговое закрепление	0,063
	Центр	0,041
СР-6	Круговое закрепление	0,082
	Центр	0,044
МР-6	Круговое закрепление	0,097
	Центр	0,058
БР-5	Круговое закрепление	0,079
	Центр	0,049
СР-5	Круговое закрепление	0,098
	Центр	0,043

Как видно из таблицы 3, наименьшие значения деформаций показывает схема оребрения «шестиконечная звезда» с высотой ребер 90 мм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Reflector Antennas [Электронный ресурс] // HPS GmbH. [сайт]. URL: <http://www.hps-gmbh.com/en/portfolio/subsystems/reflector-antennas/>
- [2] *Baunge M., Ekstrom H., Ingvarson P., Petersson M.* A new concept for dual gridded reflector // Proceed. 4-th European Conf. on Antenna and Microwave Propagation (EuCAP) (12—16 April 2010, Barcelona, Spain). 5 p.
- [3] *Биткина Е.В., Денисов А.В., Биткин В.Е.* Конструктивно-технологические методы создания размеростабильных космических композитных конструкций интегрального типа // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 4-2. С. 555—560.
- [4] *Вечтомов В.А., Зимин В.Н., Кузенков А.Н., Дронов Д.В., Козлов А.А.* Бортовая многолучевая антенна Ка-диапазона для зонированного обслуживания территории РФ спутниковой связью с высокоскоростным доступом // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение», Спец. выпуск № 7 «Радиооптические технологии в приборостроении». 2012. № 7. С. 70—81.
- [5] *Резник С.В.* Актуальные проблемы проектирования, производства и испытания ракетно-космических композитных конструкций // Инженерный журнал: Наука и инновации. 2013. (Труды МГТУ. № 606. С. 295—311).
- [6] *Резник С.В., Денисов О.В., Чуднов И.В.* Основные подходы к формированию программы термовакуумных испытаний прецизионных рефлекторов зеркальных космических антенн // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2013. № 8. С. 167—184.
- [7] *Михайловский К.В., Резник С.В.* Разработка математико-алгоритмического обеспечения для расчета внутренних напряжений в тонкостенных рефлекторах из углепластика во время технологического процесса их изготовления // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2013. № 8. С. 151—166.
- [8] *Reznik S.V.* Advanced directions of research in the field of composite structures for space antennas // Proc. 3-rd Int. Conf. on Advanced Composite Materials and Technologies for Aerospace Applications (May 13—16, 2013, Wrexham, Nord Wales, UK). P. 7—11.
- [9] *Резник С.В., Просунцов П.В., Азаров А.В.* Проектные исследования рефлекторов зеркальных космических антенн с высокой стабильностью формы и малой погонной плотностью // Матер. 6-го Белорусского космического конгресса (28—30 октября 2014 г., Минск). Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2014. Т. 1. С. 223—226.
- [10] *Резник С.В., Просунцов П.В., Азаров А.В.* Обоснование конструктивно-компоновочной схемы рефлектора зеркальной космической антенны с высокой стабильностью формы и малой погонной плотностью // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. № 3. С. 674—680.
- [11] *Резник С.В., Просунцов П.В., Азаров А.В.* Моделирование температурного и напряженно-деформированного состояний рефлектора зеркальной космической антенны // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. № 4. С. 945—950.
- [12] *Reznik S., Prosuntsov P., Timoshenko V., Denisov O., Minakov D., Mikhailovsky K.* Thermal vacuum tests of the lightweight reflector for a space antenna // Proc. 36-rd ESA Antenna Workshop on Antennas and RF Systems for Space Science (5—9 October 2015, Noordwijk, The Netherlands). 6 p.
- [13] *Reznik S., Prosuntsov P., Azarov A.* Design study of a lightweight reflector for the space antenna // Proc. 36-rd ESA Antenna Workshop on Antennas and RF Systems for Space Science (5—9 October 2015, Noordwijk, The Netherlands). 1 p.
- [14] *Резник С.В., Просунцов П.В., Азаров А.В.* Обоснование конструктивно-компоновочной схемы рефлектора зеркальной космической антенны с высокой стабильностью формы и малой погонной плотностью // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. № 3. С. 674—680.
- [15] *Reznik S.V., Novikov A.D.* Comparative analysis of the honeycomb and thin-shell space antenna reflectors // МАТЕС Web of Conferences 01012 (2017) Thermophysical Basis of Energy Technologies, 2016. 5 p.

- [16] *Prosuntsov P.V., Reznik S.V., Mikhailovsky K.V., Novikov A.D.* Study variants of hard CFRP reflector for intersatellite communication // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 153. No. 1. 7 p.

© Новиков А.Д., Просунцов П.В., Резник С.В., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: август 2017

Дата принятия к печати: сентябрь 2017

Для цитирования:

Новиков А.Д., Просунцов П.В., Резник С.В. Определение конструктивного облика рефлектора зеркальной космической антенны из композиционного материала // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: «Инженерные исследования»*. 2017. Т. 18. № 3. С. 308–317. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-308-317

Сведения об авторах:

*Новиков Андрей Дмитриевич*, аспирант, ассистент кафедры СМ13 «Ракетно-космические композитные конструкции». *Сфера научных интересов*: проектирование, производство и испытание космических конструкций из композиционных материалов. *Контактная информация*: e-mail: novikov.andrey.sm13@gmail.com

*Просунцов Павел Викторович*, доктор технических наук, профессор кафедры СМ13 «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана. *Сфера научных интересов*: моделирование и идентификация тепловых процессов в конструкциях ракет и космических аппаратов. *Контактная информация*: e-mail: pavel.prosuntsov@mail.ru

*Резник Сергей Васильевич*, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой СМ13 «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана. *Сфера научных интересов*: проектирование, производство и испытание конструкций ракетно-космической техники из композиционных материалов. *Контактная информация*: e-mail: sreznik@bmstu.ru

## MIRROR SPACE ANTENNA REFLECTOR MADE OF COMPOSITE MATERIALS CONSTRUCTIVE APPEARANCE DETERMINATION

A.D. Novikov, P.V. Prosuntsov, S.V. Reznik

Bauman Moscow State Technical University (National Research University)  
2-nd Baumanskaya str., 5/1, Moscow, Russia, 105005

This article describes search studies of optimal design and technological solutions for the ultralight mirror space antenna reflectors made of CFRP. The studies included finite element modeling of the reflector temperature and stress-strain state in the geostationary orbit. As a result of comparing the results of a number of reflector variants modeling, a design was chosen, with minimal values of temperature displacements and linear density.

**Key words:** mirror space antenna reflector, finite element simulation, constructive layout, composite material

## REFERENCES

- [1] Reflector Antennas [Internet] // HPS GmbH. URL: <http://www.hps-gmbh.com/en/portfolio/subsystems/reflector-antennas/>
- [2] Baunge M., Ekstrom H., Ingvarson P., Petersson M. A new concept for dual gridded reflector. *Proceed. 4-th European Conf. on Antenna and Microwave Propagation (EuCAP) (2010 Apr 12—16; Barcelona, Spain)*. 5 p.
- [3] Bitkina E.V., Denisov A.V., Bitkin V.E. Structural and Technological Methods for Creating Dimensional Space Composite Structures of Integral Typ. *Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012. Vol. 14. No. 4-2. P. 555—560. (In Russ).
- [4] Vechtomov V.A., Zimin V.N., Kuzenkov A.N., Dronov D.V., Kozlov A.A. The onboard multi-beam antenna of the K-band for zoned service of the territory of the Russian Federation by satellite communication with high-speed access. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University*. 2012. No. 7. P. 70—81. (In Russ).
- [5] Reznik S.V. Actual problems of design, production and testing of rocket-space composite structures. *Engineering Journal: Science and Innovations*. 2013. No. 606. P. 295—311.
- [6] Reznik S.V., Denisov O.V., Chudnov I.V. Basic approaches to the formation of the program of thermovacuum tests of precision reflectors of mirror cosmic antennas. *Science and education: electronic scientific and technical publication*. 2013. No. 8. P. 167—184. (In Russ).
- [7] Mikhailovsky K.V., Reznik S.V. Development of mathematical and algorithmic support for the calculation of internal stresses in thin-walled reflectors from carbon plastic during the technological process of their manufacture. *Science and education: electronic scientific and technical publication*. 2013. No. 8. P. 151—166. (In Russ).
- [8] Reznik S.V. Advanced directions of research in the field of composite structures for space antennas. *Proc. 3-rd Int. Conf. on Advanced Composite Materials and Technologies for Aerospace Applications (2013 May 13—16; Wrexham, Nord Wales, UK)*. P. 7—11.
- [9] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Azarov A.V. Design studies of reflectors of mirror cosmic antennas with high stability of shape and small line density. *Proc. 6th Belarusian Space Congress (2014 October 28—30; Minsk, Belarus)*. 2014. Vol. 1. P. 223—226. (In Russ).
- [10] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Azarov A.V. Substantiation of the constructive-layout scheme of the reflector of a mirror cosmic antenna with high shape stability and low linear density. *Journal of Engineering and Physics*. 2015. Vol. 88. No. 3. P. 674—680. (In Russ).
- [11] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Azarov A.V. Modeling of the temperature and stress-strain states of the reflector of a mirror cosmic antenna. *Journal of Engineering and Physics*. 2015. Vol. 88. No. 4. P. 945—950. (In Russ).
- [12] Reznik S., Prosuntsov P., Timoshenko V., Denisov O., Minakov D., Mikhailovsky K. Thermal vacuum tests of the lightweight reflector for a space antenna. *Proc. 36-rd ESA Antenna Workshop on Antennas and RF Systems for Space Science (2015 October 5—9; Noordwijk, The Netherlands)*. 6 p.
- [13] Reznik S., Prosuntsov P., Azarov A. Design study of a lightweight reflector for the space antenna. *Proc. 36-rd ESA Antenna Workshop on Antennas and RF Systems for Space Science (2015 October 5—9; Noordwijk, The Netherlands)*. 1 p.
- [14] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Azarov A.V. Substantiation of the constructive-layout scheme of the reflector of a mirror cosmic antenna with high shape stability and low linear density. *Journal of Engineering and Physics*. 2015. Vol. 88. No. 3. P. 674—680. (In Russ).
- [15] Reznik S.V., Novikov A.D. Comparative analysis of the honeycomb and thin-shell space antenna reflectors. *MATEC Web of Conferences 01012(2017) Thermophysical Basis of Energy Technologies*. 2016. 5 p.
- [16] Prosuntsov P.V., Reznik S.V., Mikhailovsky K.V., Novikov A.D. Study variants of hard CFRP reflector for intersatellite communication. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 153. No. 1. 7 p.

**Article history:**

Received: August 2017

Accepted: September 2017

**For citation:**

**Novikov A.D., Prosuntsov P.V., Reznik S.V. (2017) Mirror space antenna reflector made of composite materials constructive appearance determination. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(3), 308–317. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-308-317**

**Bio Note:**

*Novikov Andrey Dmitrievich*, post graduate student, assistant professor of the department SM13 “Rocket and space composite structures” of the Bauman Moscow State Technical University. *Research interests*: design, producing and testing of space composite structures *Contact information*: e-mail: novikov.andrey.sm13@gmail.com

*Prosuntsov Pavel Viktorovich*, Doctor of Technical Sciences, professor of the department SM13 “Rocket and space composite structures” of the Bauman Moscow State Technical University. *Research interests*: modeling and identification of thermal processes in rocket and spacecraft structures. *Contact information*: e-mail: pavel.prosuntsov@mail.ru

*Reznik Sergey Vasilyevich*, Doctor of Technical Sciences, professor, head of the department SM13 “Rocket and space composite structures” of the Bauman Moscow State Technical University. *Research interests*: design, producing and testing of rocket and space composite structures. *Contact information*: e-mail: sreznik@bmstu.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-318-324

УДК 678.01

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В КОНСТРУКЦИИ КРИОНЕННОГО РАЗГОННОГО БЛОКА «12 КРБ»

Г.Е. Нехороших

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)  
2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, Москва, Россия, 105005

Приведены результаты проектирования, изготовления, экспериментальной отработки и внедрения в производство технологических процессов изготовления трубопроводов сложной формы из полимерных пленочных материалов, нашедших применение при создании криогенного разгонного блока «12КРБ».

**Ключевые слова:** проектирование, разгонный блок, внебаковый трубопровод, теплоизолирующее покрытие, жидкий водород, полиимидные пленки, песчано-клеевые оправки, многослойная намотка, экспериментальная отработка, герметичность

**Введение.** Жидкий водород является одним из лучших горючих, обеспечивающих в сочетании с кислородом достижение наиболее высокой удельной тяги среди жидкостных ракетных двигателей. Вместе с тем его применение порождает ряд достаточно сложных научно-технических проблем транспортировки, хранения и использования в двигателях ракет-носителей (РН) и разгонных блоков (РБ). За последние годы экспериментально отработаны и апробированы на образцах, модельных и натуральных изделиях ряд новых технологических процессов и видов оснастки, в том числе и технология изготовления прямо- и криволинейных композитных трубопроводов, предназначенных для транспортировки криогенных компонентов топлива (вплоть до температуры 20 К).

Технологические рекомендации, оборудование и оснастка для изготовления подобных трубопроводов были внедрены при участии автора в ГКНПЦ им. М.В. Хруничева и использовались при изготовлении криогенных разгонных блоков.

### 1. Особенности кислородно-водородного разгонного блока «12КРБ»

Кислородно-водородный разгонный блок «12КРБ» разработан и изготовлен в ГКНПЦ им. М.В. Хруничева по соглашению с Индийской организацией космических исследований (ISRO) для РН GSLV (Geosynchronous Satellite Launch Vehicle). По соглашению предусматривалась передача поставляемых Россией Индии семи летных «12КРБ» и двух полноразмерных макетов для отработки технологии работ и для отработки заправки.

«12КРБ» оснащался ЖРД КВД-1 разработки КБХМ им. А.М. Исаева на компонентах топлива «жидкий кислород + жидкий водород» тягой 7,5 тс (около 750 кН) с удельной тягой — 461 с. В составе РН GSLV «12КРБ» массой 12 т обеспечивает выведение с космодрома Шрихарикота на геопереходную орбиту космических аппаратов массой до 2,5 т.

#### **Проблемы создания композитных трубопроводов, предназначенных для транспортировки криогенных компонентов ракетного топлива.**

Рабочие температуры топливных магистралей (до 20 К) затрудняют применение традиционно используемых для этих целей металлических сплавов. При воздействии криогенных температур они значительно изменяют свои линейные размеры (особенно сказывается уменьшение длины) и охрупчиваются. Во избежание повреждений требуется установка нескольких сильфонных компенсаторов, что приводит к переутяжелению и удорожанию конструкций таких магистралей. Для решения возникших проблем были проведены расчетно-теоретические и экспериментальные исследования по поиску новых материалов, способных работать при отрицательных температурах и в агрессивных средах [1; 2]. В ходе работ было выявлено, что к таким материалам относятся, в частности, дублированные полиимидные пленки с двусторонним покрытием фторопласта (ПМФ-352). Они обладают малой газопроницаемостью, повышенной прочностью, высокой химической стойкостью, что обеспечивает им работоспособность при криогенных температурах.

Применению полимерных трубопроводов из полиимидного композиционного материала предшествовала большая научно-исследовательская работа. В процессе ее выполнения были разработаны конструкции полиимидных трубопроводов, в том числе сложной конфигурации, металлических законцовок для их соединения, технологический процесс изготовления и технологическая оснастка, необходимая для осуществления этого процесса и испытаний трубопроводов, а также изучены основные физико-механические характеристики полиимидного композиционного материала при нормальных и криогенных температурах.

Полиимидные пленки с фторопластовым покрытием стали основным материалом, из которого были изготовлены трубопроводы методом многослойной намотки на удаляемую технологическую оправку, изготавливаемую из песчано-клеевой смеси (удаляется вымыванием в проточной воде), либо из тонкостенной трубчатой заготовки из алюминиевого сплава типа АМг-6 (удаляется травлением в растворе NaOH).

Последовательность этапов изготовления пленочных трубопроводов такая:

- формование удаляемых оправок;
- сборка оправок с соединительными законцовками и установка их на نامоточном оборудовании (рис. 1);
- намотка слоев полиимидной пленки (рис. 2);
- термообработка намотанных изделий;
- вымывание песчано-клеевой оправки;
- опрессовка;
- контроль герметичности.

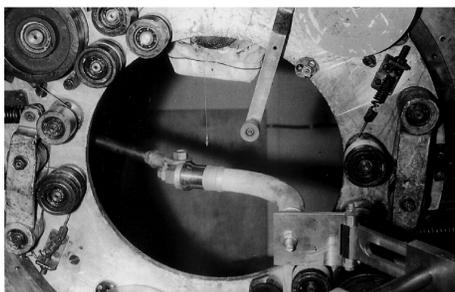
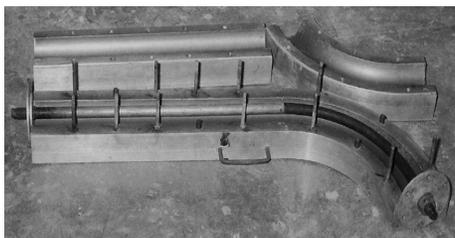


Рис. 1. Установка оправки на намоточном станке

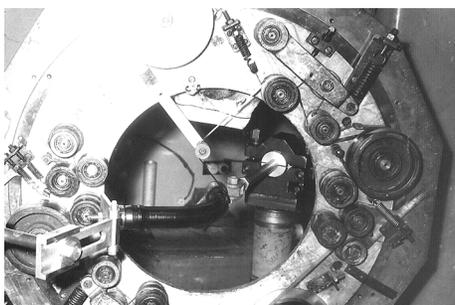


Рис. 2. Намотка слоев полиимидной пленки

Конструкция полностью укомплектованного разгонного блока «12КРБ» (рис. 5) включала в себя 27 наименований композитных топливопроводов (внебаковых с теплоизоляцией и внутрибаковых) различной конфигурации диаметром от 30 до 80 мм.

Комплекты полиимидных трубопроводов для стендовых и летных изделий «12КРБ» изготавливались в МГТУ им. Н.Э. Баумана, а испытывались в КБ «Салют». Применение композитных трубопроводов позволило добиться ряда преимуществ по сравнению с металлическими трубопроводами:

- снижение массы топливных магистралей на 20—30%;
- сохранение пластичности трубопроводов до температуры 20 К;
- исключение из конструкции дорогостоящих и тяжелых компенсаторов перемещений;
- обеспечение герметичности по гелию  $5 \cdot 10^{-3}$  л·мкм·рт.ст./с;
- допустимое абсолютное давление внутренней среды до 2 МПа (20 кг/см<sup>2</sup>);
- низкая фактическая газопроницаемость композитных трубопроводов по гелию, обеспечивающая пожаро-, взрывобезопасную эксплуатацию.

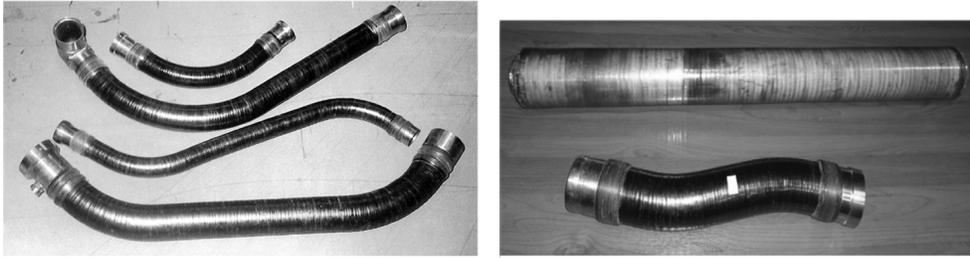
Конструкция внебаковых трубопроводов обязательно предусматривает нанесение наружной теплоизоляции. Полиимидные трубопроводы (рис. 3) представляют собой оболочки из пленочного пластика с металлическими законцовками из нержавеющей стали (12Х18Н10Т).

В процессе отработки конструкции разгонного блока на Ракетно-космическом заводе ГКНПЦ им. М.В. Хруничева были сделаны и отправлены в Индию два полноразмерных макета «12КРБ» (рис. 4).

Изготовление макетов обеспечивало решение следующих задач:

- отработка технологии подготовки к запуску, электрических проверок системы управления и ее отработки (технологический макет *N*);
- проверка всех стыков и заправочного оборудования космодрома (заправочный макет *G*).

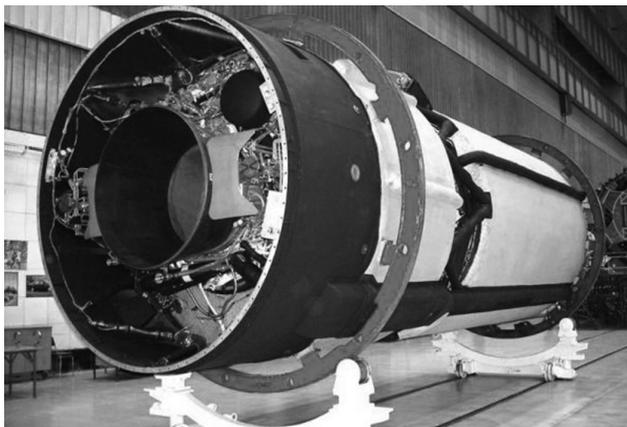
Испытания ЖРД КВД-1М и всего криогенного блока в сборе проходили на экспериментальной базе НИИ Химмаш (в настоящее время ФКП «НИЦ РКП», Пересвет) [3].



**Рис. 3.** Разнообразие полиимидных трубопроводов



**Рис. 4.** Технологический макет «12КРБ»



**Рис. 5.** Криогенный разгонный блок «12КРБ»

Еще одним важным преимуществом композитных трубопроводов, получаемых методом намотки является возможность изготовления изделий любой, определяемой прочностным расчетом, толщины. Толщина использовавшихся ранее металлических трубопроводов определялась существующими стандартными нормативами и возможностями прокатного оборудования.

Первый успешный пуск GSLV с криогенным разгонным блоком «12КРБ» был осуществлен 18 апреля 2001 года (рис. 6).



**Рис. 6.** Ракета-носитель GSLV с криогенным разгонным блоком «12КРБ»  
(вторая ступень сверху)

Положительные результаты использования полимерных трубопроводов в разгонном блоке, работающем на криогенных топливах, позволили рекомендовать данный материал для изготовления трубопроводов аналогичного назначения в конструкциях РН семейства «Ангара» (рис. 7).



**Рис. 7.** Ангара 1.2

В связи с этим, в рамках научно-технического сотрудничества специалистов КБ «Салют» и МГТУ им. Н.Э. Баумана на базе Ракетно-космического завода ГКНПЦ им. М.В. Хруничева создан участок по производству полиимидных композитных трубопроводов [2]. Полученный опыт используется при создании трубопроводов из полимерных композиционных материалов с внутренним диаметром до 300 мм для РН «Ангара».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Научные школы Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана. История развития / под ред. И.Б. Федорова, К.С. Колесникова. 2-е изд., доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 464 с.
- [2] Научно-технические разработки ОКБ-23 — КБ «Салют». М.: Воздушный транспорт, 2006. 720 с.
- [3] URL: <http://www.novosti-kosmonavtiki.ru/content/numbers/188-189/24.shtml>

© Нехороших Г.Е., 2017

### История статьи:

Дата поступления в редакцию: август 2017

Дата принятия к печати: сентябрь 2017

### Для цитирования:

**Нехороших Г.Е. Опыт применения полимерных пленочных материалов в конструкции криогенного разгонного блока «12 КРБ» // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: «Инженерные исследования». 2017. Т. 18. № 3. С. 318–324. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-318-324**

### Сведения об авторе:

*Нехороших Геннадий Евгеньевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры СМ13 МГТУ им. Н.Э. Баумана «Ракетно-космические композитные конструкции». *Контактная информация*: e-mail: nekhor47ge@mail.ru

## EXPERIENCE OF APPLICATION OF POLYMERIC PELLICLE MATERIALS IN CONSTRUCTION OF CRYOGENIC STARTING BLOCK «КРБ-12»

G.E. Nekhorosikh

Bauman Moscow State Technical University  
(National Research University)  
2-nd Baumanskaya str., 5/1, Moscow, Russia, 105005

The results of design, fabrication, experimental testing and introduction of technological processes of manufacture of pipelines complex shapes from polymeric film materials, which was used when creating a cryogenic upper stage “12КРБ» is presented.

**Key words:** design, upper stage, webcopy tubing, heat-insulating coating, liquid hydrogen, polyimide film, sand and glue the mandrel, a multilayer winding, experimental testing, tightness

## REFERENCES

- [1] Scientific schools of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. History of development / Ed. I.B. Fedorova, K.S. Kolesnikova. 2 nd ed., Ext. Moscow: MSTU them. N.E. Bauman, 2005. 464 p.

- [2] Scientific and technical developments of DB-23 — DB “Salyut”. М.: Aircraft, 2006. 720 p.  
[3] URL: <http://www.novosti-kosmonavtiki.ru/content/numbers/188-189/24.shtml>

**Article history:**

Received: August 2017

Accepted: September 2017

**For citation:**

**Nekhorosikh G.E. (2017) Experience of application of polymeric pellicle materials in construction of cryogenic starting block «КРБ-12». *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(3), 318–324. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-318-324**

**Bio Note:**

*Nekhorosikh G.E.*, кандидат технических наук, доцент кафедры СМ13 МГТУ им. Н.Э. Баумана «Ракетно-космические композитные конструкции». Контактная информация:  
e-mail: nekhor47ge@mail.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-325-337

УДК 629.7: 536.2

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ГИБКИХ ПРОВОДНИКАХ ГАЛОГЕННЫХ ЛАМП СТЕНДА ТЕПЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Р.С. Балджиев, А.А. Алексеев, П. В. Просунцов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)  
2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, Москва, Россия, 105005

Работа посвящена оценке возможности применения серийно выпускаемых галогенных ламп накаливания в стендах радиационного нагрева большой мощности с активным охлаждением колб. Проведено комплексное моделирование электрических и тепловых процессов, возникающих при различных (стандартном, форсированном и чрезвычайном) режимах работы стенда. Получены значения температуры в отдельных элементах системы питания ламп. Предложен рациональный, с точки зрения безопасности и обеспечения длительной бесперебойной работы, вариант конструкции стенда, предусматривающий охлаждение гибких проводов и шин потоком воздуха.

**Ключевые слова:** стенд радиационного нагрева, тепловые испытания, галогенные лампы накаливания

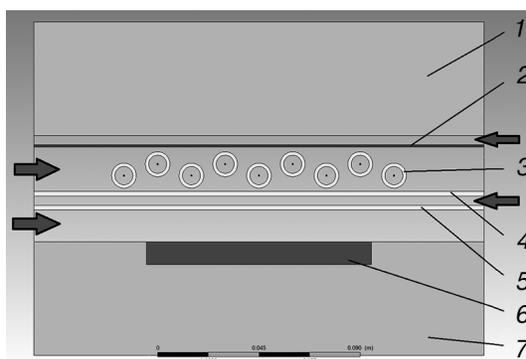
В настоящее время в связи с развитием аэрокосмической техники и появлением новых проектов многоразовых космических аппаратов и ракет-носителей возникает необходимость в создании современного поколения стендов тепловых испытаний, сочетающих в себе возможность достижения высоких рабочих температур при относительной простоте конструкции и низкой стоимости эксплуатации.

Наибольшее распространение при проведении тепловых испытаний получили стенды радиационного нагрева на базе галогенных ламп накаливания (ГЛН) [1; 2], которые отличаются сравнительно невысокой стоимостью, простотой регулирования, широким ассортиментом размеров и мощностей источников нагрева.

ГЛН по исполнению и принципу действия аналогичны другим типам ламп накаливания, за тем исключением, что в газе-наполнителе содержатся небольшие добавки галогенов (фтор, бром, хлор, йод) или их соединений, препятствующие осаждению паров вольфрама на стенках колбы, что повышает срок службы ламп и препятствует уменьшению светового потока от вольфрамовой спирали. В процессе работы ГЛН возникает повторяющийся цикл (называемый вольфрам-галогенным), включающий в себя захват паров вольфрама галогенами вдали от спирали и распад их соединения с возвращением вольфрама на спираль. Однако функционирование вольфрам-галогенного цикла возможно только в ограничен-

ном температурном диапазоне колб ламп (от 523 до 1270 К) [1]. Нарушение вольфрам-галогенного цикла приводит к осаждению атомов вольфрама на колбе лампы, потере ее прозрачности и быстрому выходу лампы из строя.

В связи с этим традиционные стенды радиационного нагрева на базе ГЛН ограничены максимальным уровнем рабочих температур объекта испытаний не более 1500 К. В то же время для отработки современных термостойких материалов и элементов конструкций требуются стенды с рабочими температурами более 2000 К [2; 3]. Такой уровень температур может быть достигнут при создании нового поколения стендов на базе ГЛН благодаря рациональному выбору размера, мощности и расположения источников нагрева и организации их эффективного активного охлаждения. Теоретическая возможность создания подобного стенда тепловых испытаний обсуждалась в работе [4]. Конструктивно-компоновочная схема стенда приведена на рисунке 1 (стрелками обозначены направления потоков газа).



**Рис. 1.** Конструктивно-компоновочная схема рабочей зоны стенда с активным охлаждением ГЛН: 1, 7 — верхний и нижний блоки теплоизоляции; 2 — стальной экран; 3 — ГЛН; 4, 5 — верхнее и нижнее разделительные стекла; 6 — объект испытания

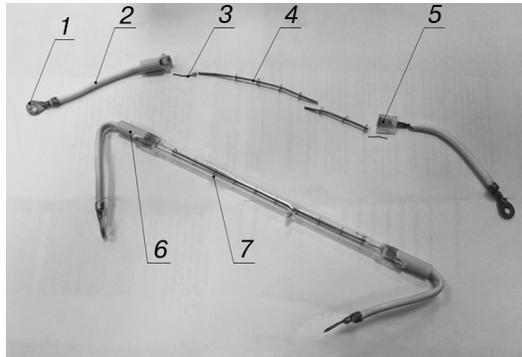
[Fig. 1. Design scheme of the working area of the facility with active cooling of halogen lamps: 1, 7 — upper and bottom heat insulations; 2 — steel screen; 3 — halogen lamps; 4, 5 — upper and bottom separating glass panels; 6 — test specimen]

Разработка стенда требует решения целого ряда сложных научных и инженерных задач, одна из которых связана с оценкой возможности безопасного применения представленных на рынке серийно выпускаемых ГЛН.

Для использования в стенде была выбрана лампа КГ 220-2000-5 (рис. 2), состоящая из следующих конструктивных элементов: клемм (1), медных проводников с трубками из кремнийорганической резины (2), вольфрамовой проволоки (3), переходящей в вольфрамовую спираль (4), соединительных пластин (5), керамических цоколей (6), стеклянной колбы (7). Основные параметры лампы указаны в таблице 1 [5].

Питание ГЛН осуществляется путем подачи напряжения на медные шины (рис. 3). Гибкие провода данной лампы изолированы трубками из кремнийорганической резины с диапазоном рабочих температур от  $-60$  до  $180$  °С [5]. Для под-

тверждения работоспособности стенда необходимо получить оценку возможных рабочих температур элементов системы питания ГЛН. Для этого следует провести совместное моделирование комплекса электрических и тепловых процессов, возникающих при работе стенда, а именно процесса прохождения электрического тока, сопровождающегося выделением Джоулева тепла и его распространением по твердым телам посредством теплопроводности, а также процессов конвективного и радиационного отвода тепла [6]. Задача усложняется тем, что все эти процессы взаимосвязаны и протекают одновременно.



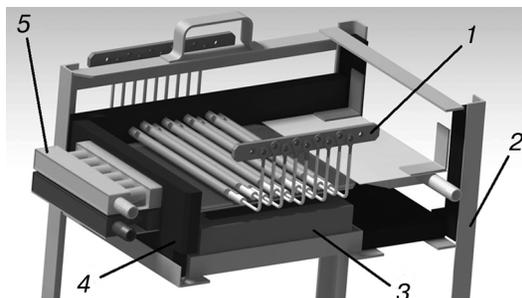
**Рис. 2.** Галогенная лампа КГ-220-2000-5: 1 — клемма; 2 — медный провод с изоляцией; 3 — вольфрамовая проволока; 4 — тело накала (вольфрамовая спираль); 5 — соединительная пластина; 6 — керамический цоколь; 7 — стеклянная колба

**[Fig. 2.** Halogen lamp KG-220-2000-5: 1 — clamp; 2 — copper wire with isolation; 3 — tungsten wire; 4 — heating coil (tungsten spiral); 5 — coupling plate; 6 — ceramic lamp base; 7 — glass bulb]

Таблица 1

**Основные характеристики галогенной лампы**

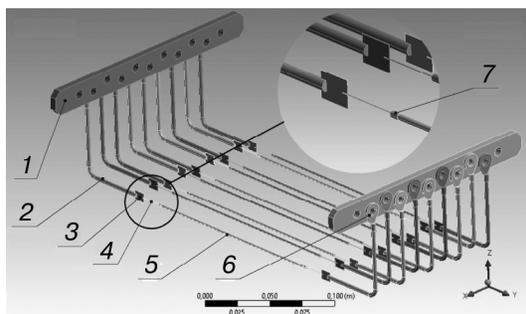
Обозначение лампы	Напряжение, В	Мощность, Вт	Размеры, мм		Тип цоколя
			Длина, включая цоколи, мм	Диаметр колбы, мм	
КГ 220-2000-5	220	2000	262	11	K10s/25



**Рис. 3.** Система питания ГЛН стенда: 1 — медная шина питания ГЛН; 2 — металлическая рама; 3 — объект испытаний; 4 — тепловая изоляция рабочей зоны; 5 — система подачи газа

**[Fig. 3.** Facility feed system: 1 — power supply copper bus line for halogen lamps; 2 — metal frame; 3 — test specimen; 4 — heat isolation of working area; 5 — gas feed system]

Геометрическая модель (рис. 4) электрической цепи системы ГЛН состоит из следующих элементов: медных шин (1), гибких многожильных медных проводов (2), соединительных пластин (3), вольфрамовой проволоки (4), модели вольфрамовой спирали (5), медных клемм (6), мест соединения проволок со спиралью (7). При этом модель вольфрамовой спирали представляет собой полый цилиндр с внешним диаметром 1,6 мм и толщиной стенок 0,3 мм, что соответствует внешнему диаметру и размеру поперечного сечения реальной спирали ГЛН [5]. Лампы включены в цепь параллельно друг другу с помощью медных шин, к которым подводится напряжение. Гибкие провода крепятся к шине с помощью клемм.



**Рис. 4.** Геометрическая модель электрической цепи системы ГЛН:  
1 — медные шины; 2 — гибкие многожильные проводники из меди;  
3 — соединительные пластины; 4 — вольфрамовая проволока; 5 — модель  
вольфрамовой спирали; 6 — медные клеммы; 7 — место  
соединения проволоки со спиралью

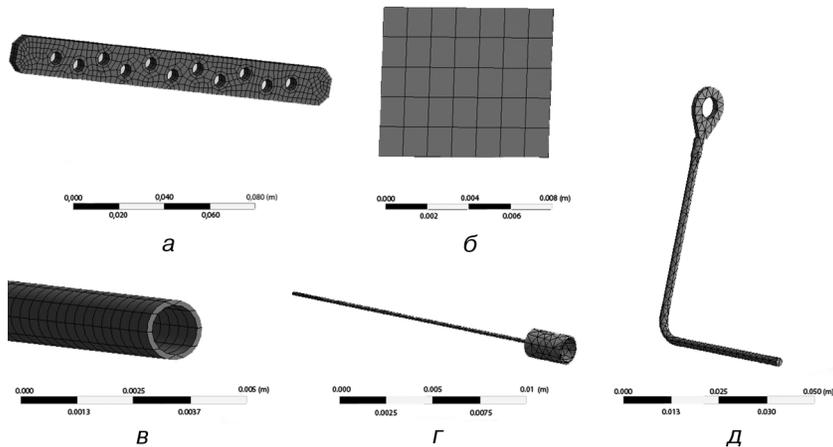
[Fig. 4. Geometric model of electric circuit of halogen lamps:  
1 — copper bus lines; 2 — flexible twisted copper conductors;  
3 — coupling plates; 4 — tungsten wire; 5 — tungsten  
coil model; 6 — copper clamps; 7 — wire-to-spiral connection]

Моделирование проводилось в конечно-элементном пакете программ ANSYS Workbench (лицензия 339001). На основе геометрической модели системы питания ГЛН была создана ее конечно-элементная модель (КЭМ) (рис. 5). Размеры элементов составили от 0,3 до 3 мм в зависимости от геометрических особенностей составных элементов цепи. Общее количество элементов сетки составило более 220 000 шт. Шаг по времени составлял 0,5 с при общей длительности процесса в 300 с. При этом продолжительность одного расчета варьировалась от 3 до 5 ч на вычислительных системах современного уровня (процессор Intel Core i7-4790).

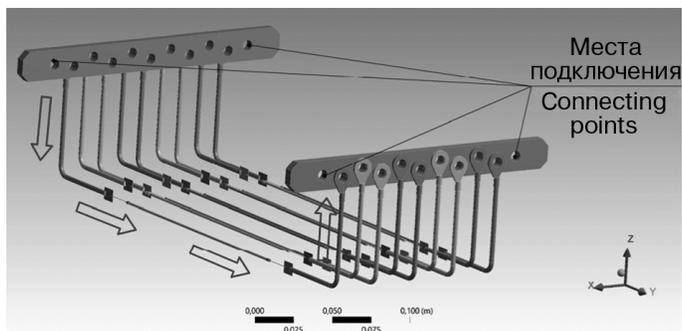
Целью первого этапа моделирования было определение количества и пространственного распределения тепла, возникающего при прохождении электрического тока по проводникам системы ГЛН. Рассматривались следующие два режима работы системы питания ГЛН:

- стандартный режим — напряжение питания 220 В;
- форсированный режим, пригодный для достаточно длительных испытаний, — напряжение питания 250 В;
- чрезвычайный режим, пригодный для кратковременных испытаний, — напряжение питания 280 В [2].

Схема подключения системы питания ГЛН представлена на рисунке 6 (стрелками указано направление прохождения тока).



**Рис. 5.** Составные части КЭМ электрической цепи: *a* — медная шина; *б* — соединительная пластина; *в* — модель вольфрамовой спирали; *г* — вольфрамовая проволока и место ее соединения со спиралью; *д* — многожильный медный проводник с клеммой  
[**Fig. 5.** Component parts of electrical circuit FEM: *a* — copper bus line; *b* — coupling plate; *c* — tungsten coil model; *d* — tungsten wire connected with the coil; *e* — twisted copper conductor with a clamp]



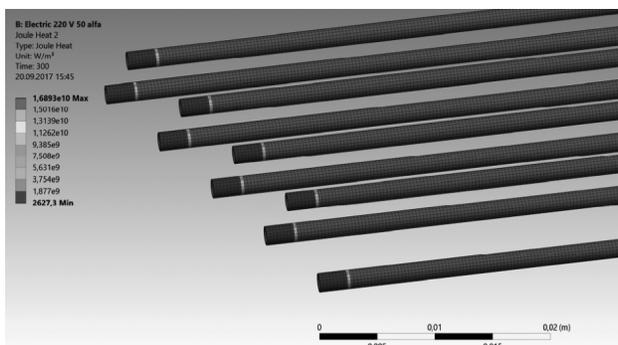
**Рис. 6.** Схема подключения системы питания ГЛН  
[**Fig. 6.** Scheme of halogen lamps set connection]

На рис. 7–9 показаны результаты моделирования электрических процессов в системе питания ГЛН и ее дополненная геометрическая модель (рис. 10).

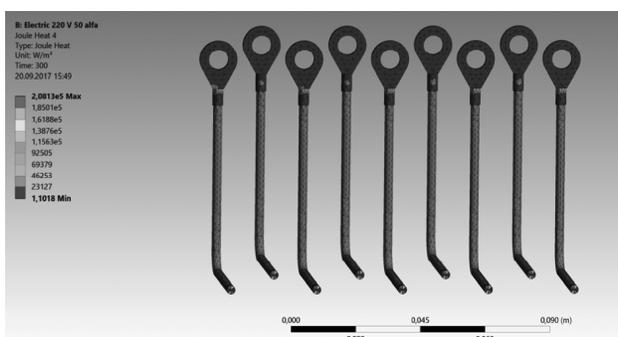
Результаты моделирования показывают, что наиболее теплонагруженными местами системы являются гибкие провода ламп и медные шины в окрестности токоподводов.

Полученное распределение объемного тепловыделения в системе питания, использовалось для моделирования нестационарного теплообмена, протекающего при работе стенда. При этом геометрическая модель системы питания для проведения теплового расчета была дополнена рядом элементов (рис. 10): изоляцией проводов, колбами и цоколями ламп. Температура колб ламп и спиралей ГЛН заимствовалась из ранее проведенного авторами расчета комбинированно-

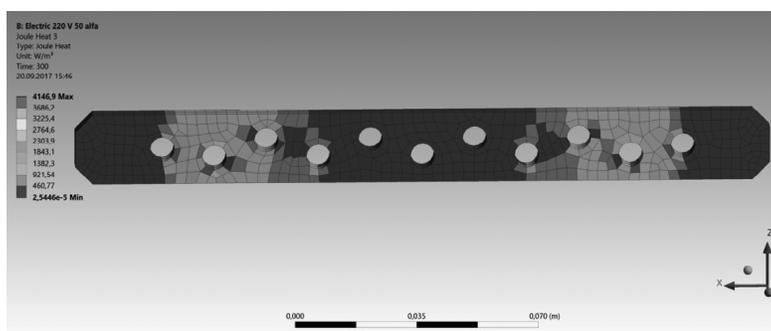
го теплообмена в рабочей зоне стенда, в котором в полной мере учитывались все радиационные эффекты и конвективный отвод тепла от колб ламп потоком сжатого газа [4].



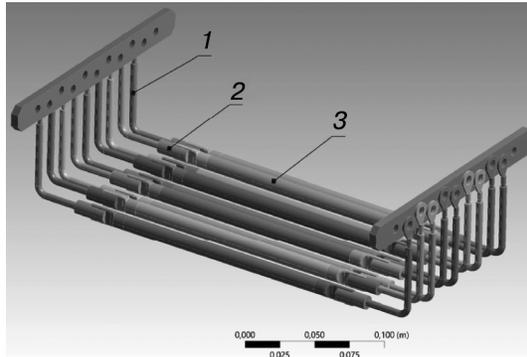
**Рис. 7.** Объемное тепловыделение в спирали при прохождении электрического тока (напряжение питания 220 В), Вт/м<sup>3</sup>  
**[Fig. 7.** Volumetric heat generation in a coil generated by current flow (supply voltage 220 V), W/m<sup>3</sup>]



**Рис. 8.** Объемное тепловыделение в гибком проводе при прохождении электрического тока (напряжение питания 220 В), Вт/м<sup>3</sup>  
**[Fig. 8.** Volumetric heat generation in a flexible conductor generated by current flow (supply voltage 220 V), W/m<sup>3</sup>]



**Рис. 9.** Объемное тепловыделение в шинах при прохождении электрического тока (напряжение питания 220 В), Вт/м<sup>3</sup>  
**[Fig. 9.** Volumetric heat generation in bus lines generated by current flow (supply voltage 220 V), W/m<sup>3</sup>]



**Рис. 10.** Дополненная геометрическая модель системы ГЛН:

1 — изоляция многожильных медных проводов;

2 — цоколь лампы; 3 — колба лампы

[Fig. 10. Complemented geometry model of halogen lamps set:

1 — isolation of twisted copper wires; 2 — lamp base; 3 — lamp bulb]

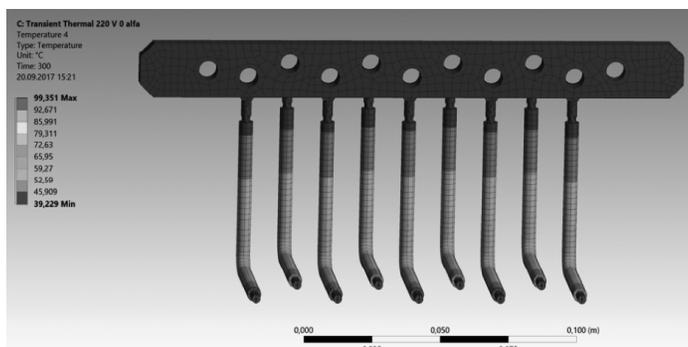
Рассматривались три различных варианта отвода тепла от элементов системы питания ГЛН:

1) шины и гибкие провода лампы выведены за пределы рабочей зоны стенда и в целях безопасности изолированы внешним кожухом, что ограничивает возможности их охлаждения. Поэтому считалось, что конвективный отвод тепла будет пренебрежимо мал, и коэффициент теплоотдачи принимался равным нулю;

2) шины и гибкие провода лампы выведены за пределы рабочей зоны стенда. Считалось, что они охлаждаются за счет естественной конвекции с коэффициентом теплоотдачи равным  $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  и за счет радиационного сброса энергии в окружающее пространство с температурой  $22 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

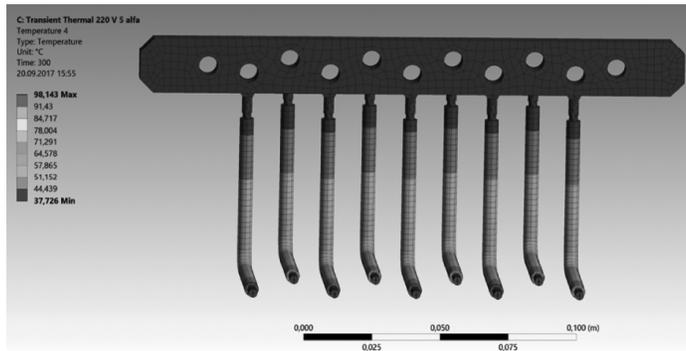
3) шины и гибкие провода лампы выведены за пределы рабочей зоны стенда, изолированы кожухом, в котором предусмотрена система принудительного охлаждения данных элементов потоком воздуха. При этом коэффициент теплоотдачи принимался равным  $50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Результаты моделирования этих вариантов при различных напряжениях питания представлены на рисунках 11–19.

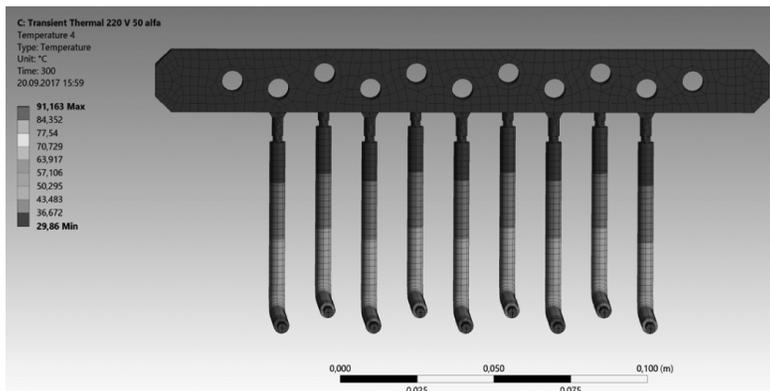


**Рис. 11.** Температура медной шины, гибких проводников и их изоляции при использовании кожуха без системы охлаждения (напряжение питания 220 В), К

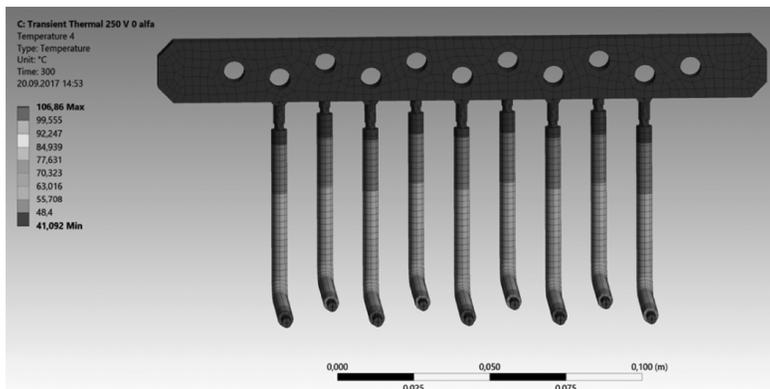
[Fig. 11. Temperature of copper bus line, flexible conductors and isolation with cover without cooling (supply voltage 220 V), K]



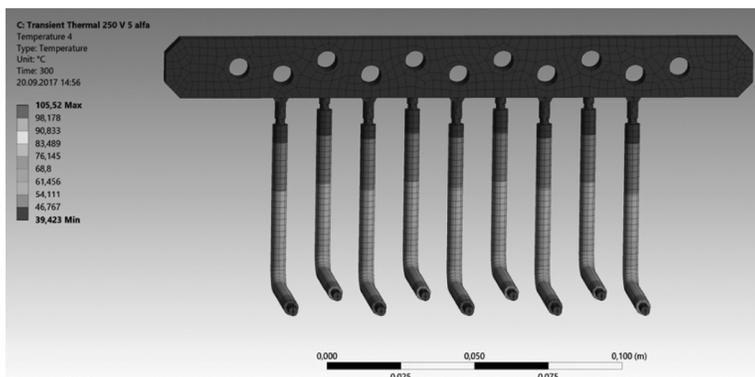
**Рис. 12.** Температура медной шины, гибких проводников и их изоляции при отсутствии кожуха (напряжение питания 220 В), К  
[**Fig. 12.** Temperature of copper bus line, flexible conductors and isolation without cover (supply voltage 220 V), K]



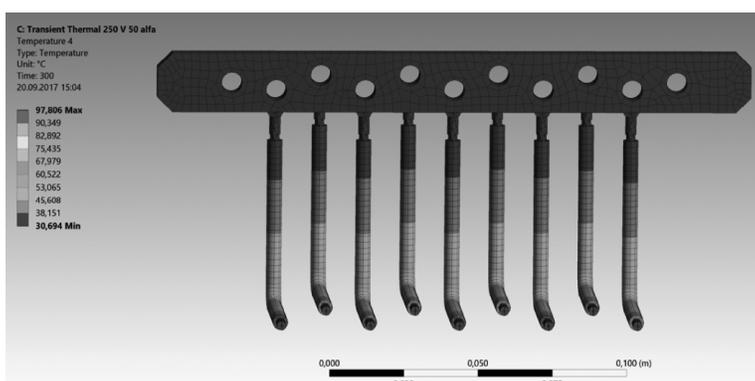
**Рис. 13.** Температура медной шины, гибких проводников и их изоляции при использовании кожуха с системой охлаждения (напряжение питания 220 В), К  
[**Fig. 13.** Temperature of copper bus line, flexible conductors and isolation with cover with cooling (supply voltage 220 V), K]



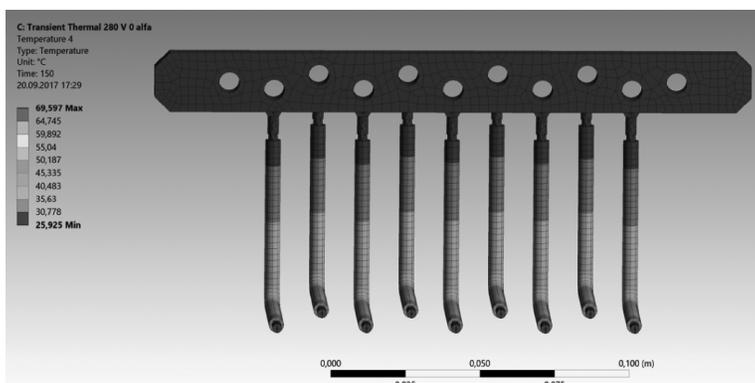
**Рис. 14.** Температура медной шины, гибких проводников и их изоляции при использовании кожуха без системы охлаждения (напряжение питания 250 В), К  
[**Fig. 14.** Temperature of copper bus line, flexible conductors and isolation with cover without cooling (supply voltage 250 V), K]



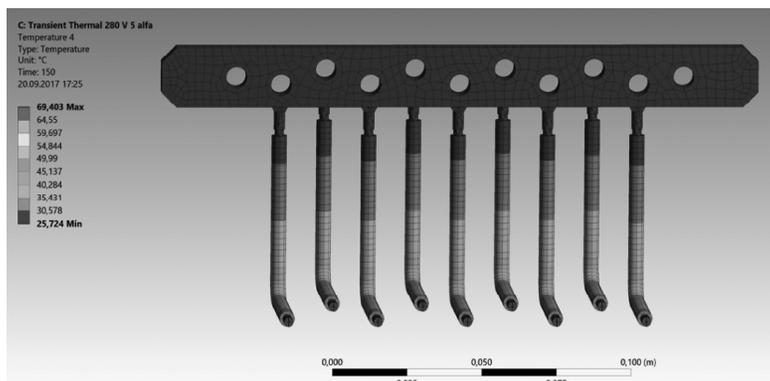
**Рис. 15.** Температура медной шины, гибких проводников и их изоляции при отсутствии кожуха (напряжение питания 250 В), К  
[**Fig. 15.** Temperature of copper bus line, flexible conductors and isolation without cover (supply voltage 250 V), K]



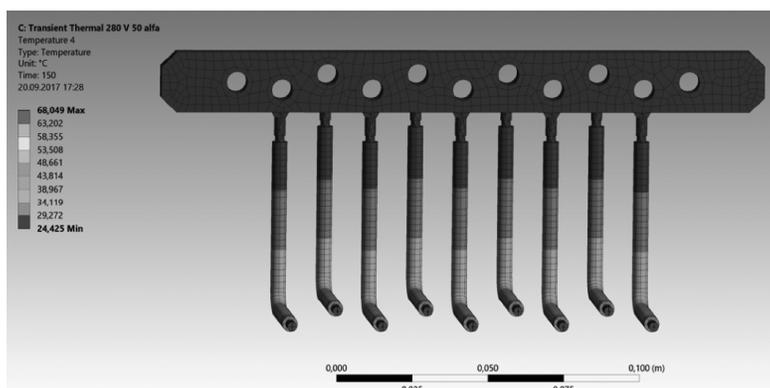
**Рис. 16.** Температура медной шины, гибких проводников и их изоляции при использовании кожуха с системой охлаждения (напряжение питания 250 В), К  
[**Fig. 16.** Temperature of copper bus line, flexible conductors and isolation with cover with cooling (supply voltage 250 V), K]



**Рис. 17.** Температура медной шины, гибких проводников и их изоляции при использовании кожуха без системы охлаждения (напряжение питания 280 В), К  
[**Fig. 17.** Temperature of copper bus line, flexible conductors and isolation with cover without cooling (supply voltage 280 V), K]



**Рис. 18.** Температура медной шины, гибких проводников и их изоляции при отсутствии кожуха (напряжение питания 280 В), К  
 [Fig. 18. Temperature of copper bus line, flexible conductors and isolation without cover (supply voltage 280 V), K]



**Рис. 19.** Температура медной шины, гибких проводников и их изоляции при использовании кожуха с системой охлаждения (напряжение питания 280 В), К  
 [Fig. 19. Temperature of copper bus line, flexible conductors and isolation with cover with cooling (supply voltage 280 V), K]

Результаты моделирования температурного состояния изоляции гибких проводов ГЛН для различных режимов работы стенда и условий отвода тепла сведены в таблицу 2.

Таблица 2

**Результаты моделирования**

Напряжение питания ГЛН, В	Время, с	Максимальная температура изоляции, °С		
		Кожух без системы охлаждения	Без кожуха	Кожух с системой охлаждения
220	300	94	93	86
250	300	101	100	92
280	150	65	64	63

Можно сделать вывод, что температура гибких проводников во всех случаях не превышает предельно допустимых для кремнийорганической резины значений.

Однако с точки зрения безопасности, обеспечения возможности длительной работы стенда и форсирования ГЛН предпочтителен вариант с кожухом, в котором предусмотрено охлаждение гибких проводов и шины потоком воздуха комнатной температуры.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Зворыкин Д.Б., Александрова А.Т., Байкальцев Б.П. Отражательные печи инфракрасного нагрева. М.: Машиностроение, 1985. 176 с.
- [2] Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 396 с.
- [3] Гофин М.Я. Жаростойкие и теплозащитные конструкции многоразовых аэрокосмических аппаратов. М.: Мир, 2003. 637 с.
- [4] Baldzhiev R., Prosuntsov P. Modeling Combined Heat Transfer in the Operating Area of the High Power Heating Test Facility // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2017. Т. 110. С. 01009. DOI: 10.1051/mateconf/201711001009.
- [5] Каталог продукции ЛИСМА [Электронный ресурс] / LISMA, 2017. URL: [http://lisma.su/katalog-produktsii/galogennyye/kg-220-2000-5/?sphrase\\_id=14481](http://lisma.su/katalog-produktsii/galogennyye/kg-220-2000-5/?sphrase_id=14481) (дата обращения: 28.08.2017).
- [6] Virag M., Murin J. Thermal Field Simulation of a Tungsten Filament Lamp Referring to Its Lifetime // Journal of ELECTRICAL ENGINEERING. 2005. V. 56. No. 9-10. P. 252–257.

© Балджиев Р.С., Алексеев А.А., Просунцов П.В., 2017

#### История статьи:

Дата поступления в редакцию: август 2017

Дата принятия к печати: сентябрь 2017

#### Для цитирования:

Балджиев Р.С., Алексеев А.А., Просунцов П.В. Моделирование теплообмена в гибких проводниках галогенных ламп стенда тепловых испытаний // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: «Инженерные исследования»*. 2017. Т. 18. № 3. С. 325–337. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-325-337

#### Сведения об авторах:

*Балджиев Риза Серверович*, магистр в области техники и технологии, аспирант кафедры СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. *Сфера научных интересов*: численное моделирование тепловых процессов в объектах аэрокосмической техники, проектирование и создание стендов для тепловых испытаний, разработка и испытание изделий из композиционных материалов. *Контактная информация*: e-mail: r.baldji@yandex.ru

*Алексеев Артемий Андреевич*, магистр в области техники и технологии, аспирант кафедры СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. *Сфера научных интересов*: численное моделирование напряженно-деформированного состояния объектов аэрокосмической техники, моделирование тепловых процессов, топологическая оптимизация композитных конструкций. *Контактная информация*: e-mail: alexart93@bk.ru

*Просунцов Павел Викторович*, доктор технических наук, профессор кафедры СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции», Московский государственный техни-

ческий университет им. Н.Э. Баумана. *Сфера научных интересов:* моделирование и идентификация процессов комбинированного теплообмена. *Контактная информация:* e-mail: pavel.prosuntsov@mail.ru

## MODELLING OF HEAT EXCHANGE IN FLEXIBLE CONDUCTORS OF HALOGEN LAMPS OF THERMAL TEST FACILITY

R.S. Baldzhiev, A.A. Alekseyev, P.V. Prosuntsov

Bauman Moscow State Technical University (National Research University)  
2-nd Baumanskaya str., 5/1, Moscow, Russia, 105005

Current work is dedicated to the evaluation of the possibility of safety use of serial halogen lamps for high power radiating heating test facilities with active cooling of the bulbs. Complex modeling of electrical and thermal processes occurring at various (standard, forced and extreme) facility operation modes has been carried out. The temperature values in the individual elements of the lamp supply system are obtained. A variant of the booth design, which provides the cooling of flexible wires and bus lines by the air flow, is rational from the point of safety and ensuring long-term uninterrupted operation view.

**Key words:** radiating heating facility, thermal tests, halogen lamps

### REFERENCES

- [1] Zvorikin D.B., Alexandrova A.T., Baikaltsev B.P. Reflective infrared heat ovens. M.: Mashinostroenie, 1985. 176 p.
- [2] Eliseev V.N., Tovstonog V.A. Heat exchange and thermal testing of materials and structures of aerospace engineering under radiation heating. M.: Bauman Moscow State Technical University Publisher, 2014. 396 p.
- [3] Gofin M.Y. Heat resistant and thermal protective structures of reusable aerospace vehicles. M.: Mir, 2003. 637 p.
- [4] Baldzhiev R., Prosuntsov P. Modeling Combined Heat Transfer in the Operating Area of the High Power Heating Test Facility. MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2017. Т. 110. S. 01009. DOI: 10.1051/mateconf/201711001009.
- [5] Product catalogue LISMA [digital resource]. LISMA, 2017. Access mode: [http://lisma.su/katalog-produktsii/galogennye/kg-220-2000-5/?sphrase\\_id=14481](http://lisma.su/katalog-produktsii/galogennye/kg-220-2000-5/?sphrase_id=14481) (accessed date: 28.08.2017).
- [6] Virag M., Murin J. Thermal Field Simulation of a Tungsten Filament Lamp Referring to Its Lifetime. *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING*. 2005. V. 56. No. 9-10. P. 252—257.

### Article history:

Received: August 2017

Accepted: September 2017

### For citation:

Baldzhiev R.S., Alekseyev A.A., Prosuntsov P.V. (2017) Modelling of heat exchange in flexible conductors of halogen lamps of thermal test facility. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(3), 325—337. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-325-337

**Bio Note:**

*Riza S. Baldzhiev*, Master of Science, postgraduate student of department SM-13 “Rocket and Space Composite Structures”, Bauman Moscow State Technical University. *Research interests*: computer simulation of thermal processes in the objects of aerospace engineering, design and construction of facilities for thermal testing, development and testing of products from composite materials. *Contact information*: e-mail: r.baldji@yandex.ru

*Artemij A. Alekseev*, Master of Science, postgraduate student of department SM-13 “Rocket and Space Composite Structures”, Bauman Moscow State Technical University. *Research interests*: computer modeling of the stress-strain state of objects of aerospace engineering, modeling of thermal processes, topological optimization of composite structures. *Contact information*: e-mail: alexart93@bk.ru

*Pavel V. Prosuntsov*, Doctor of Engineering Science, professor of department SM-13 “Rocket and Space Composite Structures», Bauman Moscow State Technical University. *Research interests*: computer modeling and identification of combined heat transfer processes. *Contact information*: e-mail: pavel.prosuntsov@mail.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-338-344

УДК 621.4

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ЮБКИ ПОРШНЯ В ЦИЛИНДРЕ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

С.В. Смирнов<sup>1</sup>, А.Р. Макаров<sup>1</sup>, А.А. Воробьев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российский университет дружбы народов  
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

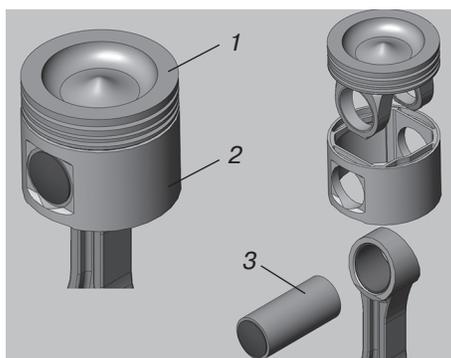
<sup>2</sup> Московский политехнический университет  
ул. Большая Семеновская, 38, Москва, Россия, 107023

В статье рассмотрена методика проведения теоретического исследования гидродинамической смазки юбки составного поршня, и влияние на нее конструктивных параметров деталей поршневой и кривошипно-шатунной групп.

**Ключевые слова:** дизель, составной поршень, гидродинамическая смазка, цилиндро-поршневая группа, трение

Повышение технического уровня автомобильных двигателей в значительной степени определяется совершенством конструкции узлов трения цилиндро-поршневой группы. Сопряжение «поршень-цилиндр» оказывает большое влияние на топливную экономичность двигателя, расход масла на угар, долговечность и безотказность, шум и вибрацию. Задача проектирования этих деталей, как элементов узла трения, состоит в выборе основных геометрических размеров, профиля направляющей части в продольной и поперечной плоскости, диаметрального зазора, координат расположения поршневого пальца и центра масс, материалов сопряженных деталей. Решение данных задач находится в прямой зависимости от возможности исследования динамики движения поршня в слое смазки в цилиндре. Наиболее полно и с наименьшими материальными затратами эти исследования могут быть проведены на математической модели движения поршня в цилиндре. Эта задача решалась в исследовании [1] для традиционного цельноалюминиевого поршня бензинового двигателя. Математическая модель, приведенная в работе [1], учитывает большинство факторов, влияющих на продольное и поперечное перемещение поршня в цилиндре: деформации юбки, вызванные ее тепловым расширением и действием боковой силы, гидродинамические реакции масляного слоя, разделяющего трущиеся поверхности юбки и цилиндра, с нагруженной и ненагруженной стороны, смещение центров их приложения относительно оси поршневого пальца при возвратно поступательном движении и деформации юбки от действия этих реакций.

Однако в настоящее время все большее распространение у форсированных дизелей, имеющих повышенные нагрузки на цилиндро-поршневую группу, получают составные поршни. Эти поршни (рис. 1) представляют из себя составную конструкцию из трех основных элементов: головки поршня, юбки поршня и поршневого пальца.



**Рис. 1.** Конструкция рассматриваемого поршня: 1 — головка поршня; 2 — юбка; 3 — палец  
[**Fig. 1.** Design of the piston: 1 — головка поршня; 2 — юбка; 3 — палец]

Составные поршни совмещают в себе следующие преимущества поршней, изготовленных из стали (чугуна) и алюминиевых поршней:

1) головка составного поршня, выполненная из стали или чугуна обладает низким коэффициентом линейного расширения, что позволяет уменьшить зазор между головкой поршня и гильзой цилиндра. Это качество положительно сказывается на уплотнении цилиндра, уменьшении вредных выбросов и токсичности выпускных газов;

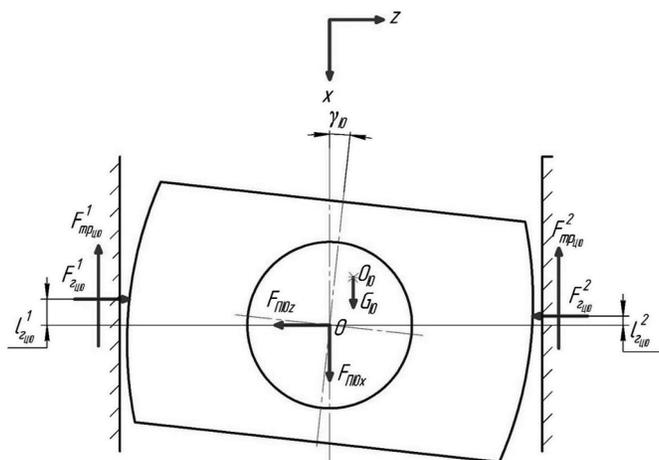
2) юбка поршня, выполненная из алюминиевых сплавов, позволяет снизить общую массу поршня, обеспечить более благоприятные условия трения, тем самым снизить потери на трение, повысить безотказность работы за счет предотвращения склонности трущихся поверхностей к задирам и натирам;

3) отсутствие прямой теплопередачи от головки поршня к юбке поршня позволяет уменьшить уровень температур юбки поршня и монтажный зазор пары трения юбка — поршня-гильза цилиндра;

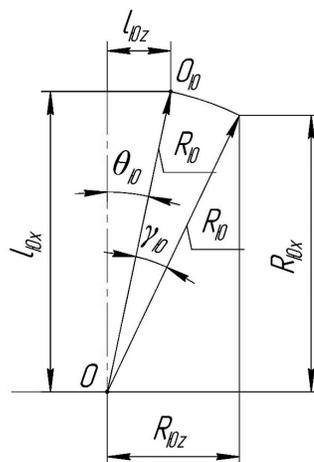
4) лучшую ремонтпригодность, чем у монолитных поршней за счет возможности отдельной замены головки поршня или юбки поршня.

Рассмотрение движения составного поршня должно включать в себя решение взаимосвязанных задач: изучение движения головки поршня с комплектом поршневых колец и движения юбки поршня с учетом влияния на него качательного движения шатуна.

Исследование движения головки поршня, помимо уравнений динамики, связано с решением задач гидродинамического трения колец, прорыва газов в картер двигателя, что является отдельными задачами. В настоящей работе ставилась задача разработки расчетных уравнений, описывающих движение только юбки (рис. 2, 3), а влияние на это движения головки поршня учитывалось силами, действующими на поршневой палец, значения которых будут уточнены в последующем исследовании.



**Рис. 2.** Силы, действующие на юбку поршня  
[**Fig. 2.** Forces, acting on the piston cup]



**Рис. 3.** Геометрические размеры расположения центра масс юбки поршня  
[**Fig. 3.** Location of the mass center of the piston skirt]

Уравнения, описывающие движения юбки поршня получим, используя второй закон Ньютона:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_x : F_{\text{ПЮ}x} - F_{\text{ТРЦЮ}}^1 - F_{\text{ТРЦЮ}}^2 + G_{\text{Ю}} = F_{jx}^{\text{Ю}} \\ \sum F_z : F_{\text{ГЦЮ}}^1 - F_{\text{ГЦЮ}}^2 - F_{\text{ПЮ}z} = F_{jz}^{\text{Ю}} \\ M_{O_{\text{Ю}}} : -F_{\text{ГЦЮ}}^1 (R_{\text{Ю}x} - l_{\text{ГЦЮ}}^1) + F_{\text{ГЦЮ}}^2 (R_{\text{Ю}x} - l_{\text{ГЦЮ}}^2) + F_{\text{ПЮ}z} l_{\text{Ю}x} - \\ \sum -F_{\text{ПЮ}x} l_{\text{Ю}z} + F_{\text{ТРЦЮ}}^1 \left( \frac{D_{\text{Ю}}}{2} + l_{\text{Ю}z} \right) - F_{\text{ТРЦЮ}}^2 \left( \frac{D_{\text{Ю}}}{2} - l_{\text{Ю}z} \right) = J_{\text{Ю}} \ddot{\gamma}_{\text{Ю}}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $F_{\text{ПЮ}x}$  и  $F_{\text{ПЮ}z}$  — проекции на ось  $x$  и  $z$  соответственно сил, действующих со стороны поршневого пальца на юбку поршня;  $F_{\text{ГЦЮ}}^1$  и  $F_{\text{ГЦЮ}}^2$  — гидродинамические силы масляного слоя в сопряжении юбка поршня-цилиндр, действующие со стороны № 1 и № 2 соответственно;  $F_{\text{ТРЦЮ}}^1$  и  $F_{\text{ТРЦЮ}}^2$  — силы гидродинамического трения в сопряжении юбка поршня-цилиндр со стороны № 1 и № 2 соответственно;  $G_{\text{Ю}}$  — сила тяжести юбки поршня;  $F_{jx}^{\text{Ю}}$  и  $F_{jz}^{\text{Ю}}$  — силы инерции юбки по оси  $x$  и  $z$  соответственно;  $J_{\text{Ю}}$  — момент инерции относительно центра масс юбки  $O_{\text{Ю}}$ ;

$$\begin{aligned} F_{jx}^{\text{Ю}} &= m_{\text{Ю}} \ddot{x}_{O_{\text{Ю}}}; \\ F_{jz}^{\text{Ю}} &= m_{\text{Ю}} \ddot{z}_{O_{\text{Ю}}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\ddot{x}_{O_{\text{Ю}}}$  и  $\ddot{z}_{O_{\text{Ю}}}$  — ускорения юбки по оси  $x$  и  $z$  соответственно;  $m_{\text{Ю}}$  — масса юбки.

Для нахождения реакций масляного слоя  $F_{\text{ГЦЮ}}^1$  и  $F_{\text{ГЦЮ}}^2$  используется разработанная авторами методика, изложенная в статье [1].

Определяющее влияние на поперечное движение юбки поршня оказывает поперечная сила  $F_{\Pi\text{Ю}z}$  со стороны поршневого пальца. Для определения данной силы рассмотрим систему сил, действующих на поршневой палец (рис. 4):

$$\begin{cases} \sum F_x : F_{\Gamma\Pi x} - F_{\text{Ш}\Pi x} - F_{\text{Ю}\Pi x} + G_{\Pi} = F_{jx}^{\Pi} \\ \sum F_z : F_{\Gamma\Pi z} + F_{\text{Ю}\Pi z} - F_{\text{Ш}\Pi z} = F_{jz}^{\Pi}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $F_{\Gamma\Pi x}$  и  $F_{\Gamma\Pi z}$  — проекции силы на оси  $x$  и  $z$ , действующей со стороны головки поршня;  $F_{\text{Ш}\Pi x}$  и  $F_{\text{Ш}\Pi z}$  — проекции силы на оси  $x$  и  $z$ , действующей со стороны шатуна;  $G_{\Pi}$  — сила тяжести поршневого пальца;  $F_{jx}^{\Pi}$  и  $F_{jz}^{\Pi}$  — силы инерции поршневого пальца вдоль оси  $x$  и  $z$ .

И, следовательно,

$$F_{\Pi\text{Ю}z} = F_{\text{Ю}\Pi z} = F_{\text{Ш}\Pi z} - F_{\Gamma\Pi z} + F_{jz}^{\Pi}. \quad (4)$$

Для определения сил, действующих со стороны головки поршня  $F_{\Gamma\Pi x}$ ;  $F_{\Gamma\Pi z}$ , и шатуна  $F_{\text{Ш}\Pi x}$ ;  $F_{\text{Ш}\Pi z}$  необходимо составить системы уравнений, описывающих их движение, в соответствии с расчетными схемами (рис. 5, 6).

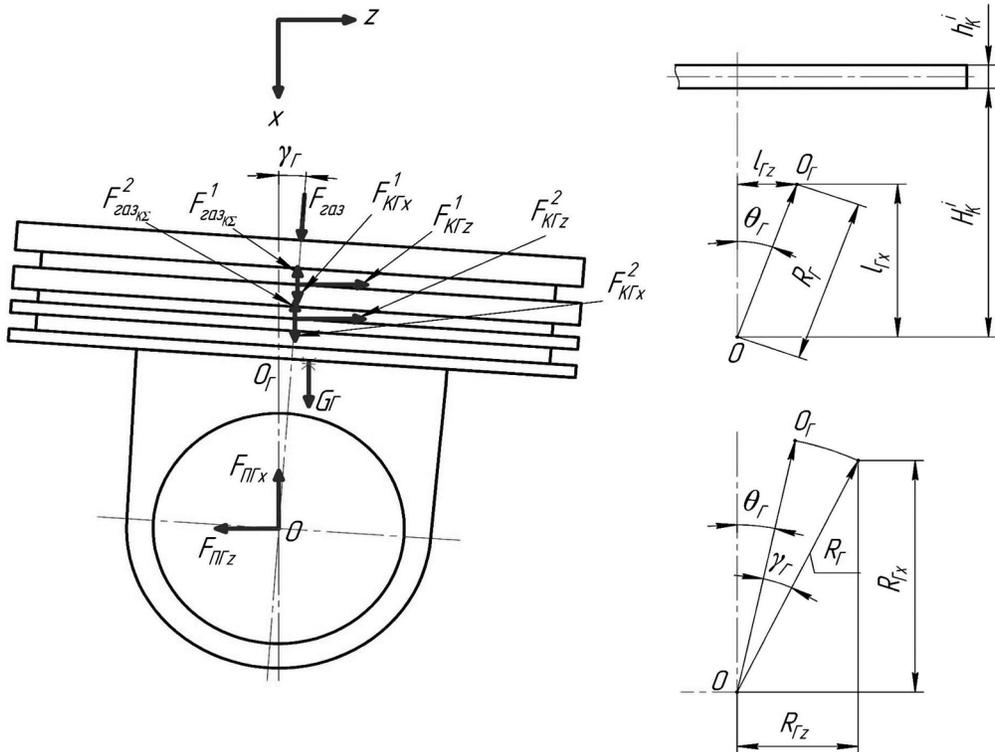


Рис. 5. Силы, действующие на головку поршня  
[Fig. 5. Forces, acting on the piston head]

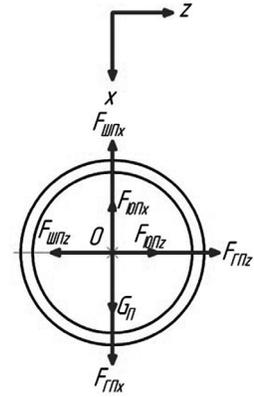
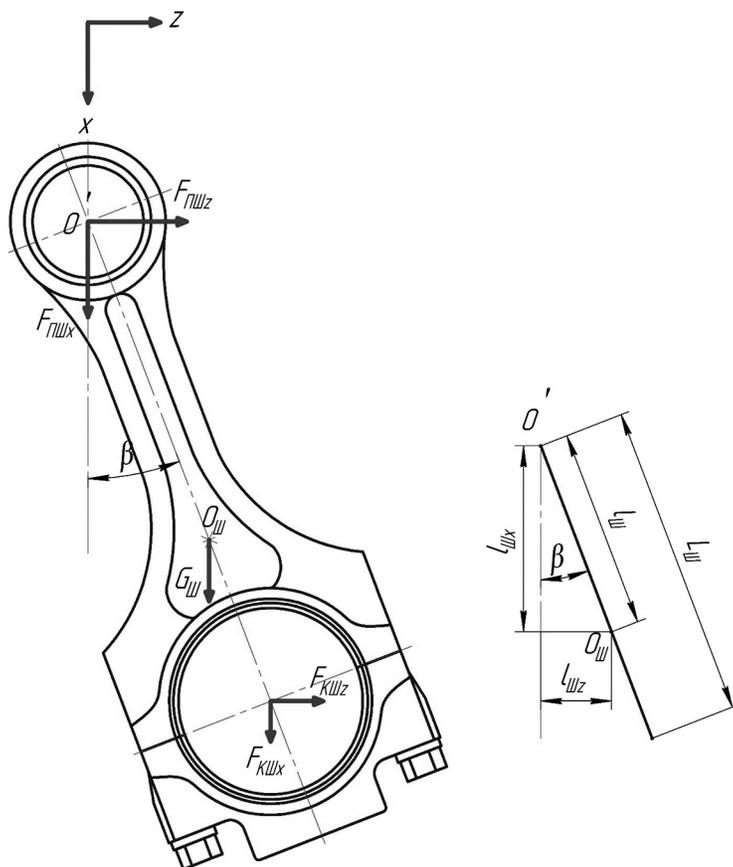


Рис. 4. Силы, действующие на поршневой палец составного поршня  
[Fig. 4. Forces, acting on the piston pin]



**Рис. 6.** Силы, действующие на шатун  
**[Fig. 6.** Forces, acting on the connecting rod

Выполнив необходимые преобразования, получим расчетные выражения для сил, входящих в уравнение (4):

$$F_{ШПz} = (F_{газ} - F_{jx}) \operatorname{tg} \beta - F_{jx}^{BP} \operatorname{tg} \beta - F_{трz} \operatorname{tg} \beta + \left( G_{Пz} + G_{Ш} \frac{L_{Ш} - l_{Ш}}{L_{Ш}} \right) \operatorname{tg} \beta + F_{jz}^{Ш} \frac{L_{Ш} - l_{Ш}}{L_{Ш}} - \frac{J_{Ш} \ddot{\beta}}{L_{Ш} \cos \beta}, \quad (5)$$

где  $(F_{газ} - F_{jx}) \operatorname{tg} \beta = N$  — боковая сила (см. учебники по динамике двигателя внутреннего сгорания);  $F_{jx}^{BP}$  — сила инерции вдоль оси  $x$ , вызванная вращательным движением деталей поршневой группы и шатуна вокруг оси поршневого пальца;  $F_{jz}^{Ш}$  — сила инерции шатуна вдоль оси  $z$ ;  $G_{П}$ ,  $G_{Ш}$  — силы тяжести от масс деталей поршневой группы и шатуна соответственно;  $F_{j кач}^{Ш} = \frac{J_{Ш} \ddot{\beta}}{L_{Ш} \cos \beta}$  — сила инерции, вызванная качательным движением шатуна;  $J_{Ш}$  — момент инерции шатуна относительно центра масс;  $\ddot{\beta}$  — угловое ускорение шатуна;  $L_{Ш}$  — длина шатуна;

$$F_{\Gamma\Pi z} = F_{\Pi\Gamma z} = \sum_{i=1}^n F_{\text{K}\Gamma z}^i - F_{jz}^{\Gamma}, \quad (6)$$

где  $F_{\text{K}\Gamma z}^i$  — сила действующая со стороны  $i$ -го кольца на головку поршня;  $F_{jz}^{\Gamma}$  — сила инерции головки поршня по оси  $z$ ;  $n$  — количество поршневых колец.

Полученные расчетные уравнения позволяют проводить комплексное исследование состояния юбки составного поршня и, в первую очередь, выполнять исследования влияния основных конструктивных параметров деталей поршневой группы и шатуна на условия гидродинамической смазки юбки поршня.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] *Макаров А.Р., Смирнов С.В., Осокин С.В.* Математическое моделирование движения поршня в цилиндре // *Известия МГТУ МАМИ*. 2014. Т. 1. № 2(20). С. 24–30.

© Смирнов С.В., Макаров А.Р., Воробьев А.А., 2017

#### История статьи:

Дата поступления в редакцию: август 2017

Дата принятия к печати: сентябрь 2017

#### Для цитирования:

**Смирнов С.В., Макаров А.Р., Воробьев А.А.** Математическое моделирование динамики движения юбки поршня в цилиндре двигателя внутреннего сгорания // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: «Инженерные исследования»*. 2017. Т. 18. № 3. С. 338–344. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-338-344

#### Сведения об авторах:

*Сергей Владимирович Смирнов*, кандидат технических наук, доцент департамента машиностроения и приборостроения инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Сфера научных интересов*: динамика движения деталей кривошипно-шатунного механизма двигателя внутреннего сгорания, гидродинамика трения в цилиндро-поршневой группе, теплонапряженность деталей двигателя внутреннего сгорания. *Контактная информация*: e-mail: Smirnof61@mail.ru

*Александр Романович Макаров*, кандидат технических наук, профессор департамента машиностроения и приборостроения инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Сфера научных интересов*: гидродинамика трения в цилиндро-поршневой группе, теплонапряженность деталей двигателя внутреннего сгорания, теория рабочих процессов двигателя внутреннего сгорания. *Контактная информация*: e-mail: a-r-makarov@yandex.ru

*Александр Алексеевич Воробьев*, магистрант кафедры энергоустановки для транспорта и малой энергетики Московского политехнического университета. *Сфера научных интересов*: теплонапряженность деталей двигателя внутреннего сгорания, проектирование и расчет цилиндро-поршневой группы. *Контактная информация*: e-mail: va731158@gmail.com

## MATHEMATICAL MODELING OF DYNAMICS MOVEMENT OF A PISTON SKIRT IN THE CYLINDER OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE

S.V. Smirnov<sup>1</sup>, A.R. Makarov<sup>1</sup>, A.A. Vorobyev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Peoples' Friendship University of Russia  
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

<sup>2</sup> Moscow Polytechnic University  
Bol'shaya Semenovskaya str., 38, Moscow, Russia, 107023

There examined method theoretical research of sectional piston skirt hydrodynamic lubrication, and influence of piston and connection rod groups options on it.

**Key words:** diesel, sectional piston, hydrodynamic lubrication, piston group, friction

### REFERENCES

- [1] Makarov A.R., Smirnov S.V., Osokin S.V. Matematicheskoe modelirovanie dvizheniya porshnya v tsilindre. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2014. Vol. 1. No. 2(20). P. 24–30. (In Russ.).

#### Article history:

Received: August 2017

Accepted: September 2017

#### For citation:

Smirnov S.V., Makarov A.R., Vorobyev A.A. (2017) Mathematical modeling of a piston skirt in the cylinder of the internal combustion. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(3), 338–344. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-338--344

#### Bio Note:

*Sergei V. Smirnov*, PhD (in Technical Sciences), Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* dynamics of the movement of the crank-connecting mechanism of the internal combustion engine, hydrodynamics of friction in the cylinder-piston group, heat stress of the internal combustion engine parts. *Contact information:* e-mail: Smirnof61@mail.ru

*Alexander R. Makarov*, PhD (in Technical Sciences), Professor at the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* hydrodynamics of friction in the cylinder-piston group, heat stress of the internal combustion engine parts, theory of the working process of an internal combustion engine. *Contact information:* e-mail: a-r-makarov@yandex.ru

*Alexander A. Vorobyev*, graduate student at the Department of Power Plants for Transport and Small Power engineering, Moscow Polytechnic University. *Research interests:* heat stress of the internal combustion engine parts, design and calculation of cylinder-piston group. *Contact information:* e-mail: va731158@gmail.com



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-345-352

УДК 629.7:620.22:536.2

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА КОРПУСА НАНОСПУТНИКА

С.В. Резник, П.В. Просунцов, О.В. Денисов, Н.М. Петров, Вонхеонг Ли

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, Москва, Россия, 105005

В данной работе представлена методика определения теплопроводности анизотропного композиционного материала (КМ) корпуса наноспутника на установке контактного нагрева. Приведено описание техники теплофизического эксперимента с образцами КМ в форме тонкостенных пластин — деталей корпуса наноспутника. Температурное состояние образцов измерялось бесконтактным методом с помощью тепловизора. Данные тепловизионных измерений использовались для определения теплопроводности КМ с помощью решения двумерной нелинейной обратной задачи теплопроводности (ОЗТ).

**Ключевые слова:** наноспутники, композиционные материалы, углепластик, анизотропия теплопроводности, математическое моделирование, тепловизионные измерения, обратная задача теплопроводности

**Введение.** В настоящее время большое внимание уделяется разработке малых космических аппаратов, в том числе микро-нано- и пикоспутников Земли [1–4]. Любые искусственные спутники Земли подвергаются тепловому воздействию прямого солнечного излучения, солнечного излучения, отраженного земной поверхностью и облачным слоем и собственного излучения Земли. Кроме того, бортовое оборудование выделяет теплоту. В состав бортового оборудования обычно входит аппаратура радиосвязи, блок управления с центральным процессором, системы стабилизации и ориентации, система энергопитания. Наибольшее количество теплоты выделяется при работе системы энергопитания. Суммарное количество теплоты, отведенное от аккумуляторов в процессе разряда, может достигать 140 Дж [5], в зависимости от степени разряда, а температура аккумулятора может превышать 50 °С [5]. Поскольку аппаратура наноспутника сохраняет свою работоспособность при температурах от –10 до +75 °С, то возникает необходимость в обеспечении заданного теплового режима.

Особенность нано- и пикоспутников заключается в том, что использование в них сложной системы обеспечения теплового режима (СОТР) с вентиляторами, радиаторами, жидкостной системы охлаждения, тепловыми трубами затруднена в силу малого объема таких спутников. Одним из способов решения данной проблемы может быть применение материалов с высокой теплопроводностью в конструкции корпуса.

Наиболее часто, корпус наноспутников изготавливается из алюминиевых сплавов, однако известно, что некоторые КМ, в частности углепластики, могут иметь теплопроводность соизмеримую с алюминием. Использование при создании КМ углеродных волокон на основе пекового прекурсора позволяет достичь значений теплопроводности, превосходящих алюминиевые сплавы [6]. При этом такие материалы имеют при меньшей плотности, более высокую удельную прочность и удельную жесткость.

При тепловом проектировании тонкостенных конструкций корпуса, которые могут выступать как теплоотводящие элементы, необходимо располагать данными по теплопроводности в плоскости армирования. Теплопроводность в направлении, перпендикулярном плоскости армирования КМ, не столь важна для тонкостенных конструкций, так как в силу малого термического сопротивления перепады температур по толщине пренебрежимо малы. К сожалению, стандартные методы для определения теплопроводности в плоскости армирования КМ не годятся, что делает актуальной разработку методик, основанных на применении современных средств воспроизведения и контроля условий нагрева образцов материалов, средств измерения, регистрации и обработки экспериментальных данных.

**Цель настоящей работы** заключалась в обеспечении проектных исследований наноспутников необходимыми данными по теплопроводности конструкционных КМ в плоскости армирования с помощью разработки и апробации новой расчетно-экспериментальной методики.

#### **1. Особенности предлагаемой методики:**

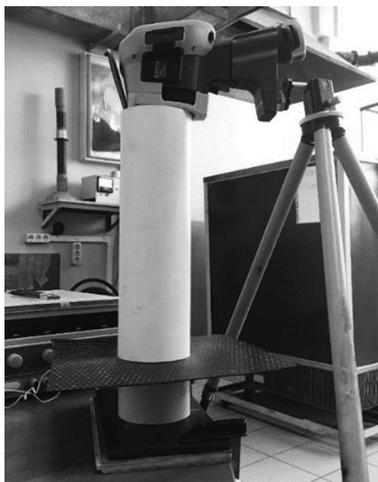
а) экспериментальными образцами служат элементы натуральных конструкций корпуса нано-пикоспутников в форме пластин из КМ с размерами сторон до  $300 \times 300$  мм<sup>2</sup>, толщиной до 3 мм. Представительный характер образцов повышает степень достоверности результатов;

б) меняющееся во времени температурное поле образцов формируется с помощью кругового контактного электрического нагревателя. Такой вариант локального нагрева выбран для применения в качестве средства тепловой диагностики — тепловизора. Он удобен для лабораторной практики и не требует специальных средств защиты персонала, которые нужны при испытаниях образцов материалов и элементов конструкций на стендах радиационного и конвективного нагрева [7];

в) динамика изменения температурного поля образца регистрируется с помощью тепловизора Fluke Ti-400, универсально пригодного для измерений температуры на горизонтальных и вертикальных поверхностях в интервале температур от  $-20$  до  $1200$  °С. Бесконтактный метод измерения температуры имеет заметные преимущества перед контактными в первую очередь по объему получаемой информации. Кроме того, при использовании термопар, существенно повышается трудоемкость подготовки образцов к испытаниям. Близкое расположение контактных датчиков осложнено их взаимным тепловым влиянием, что, в свою очередь, препятствует получению детальной картины температурного распределения;

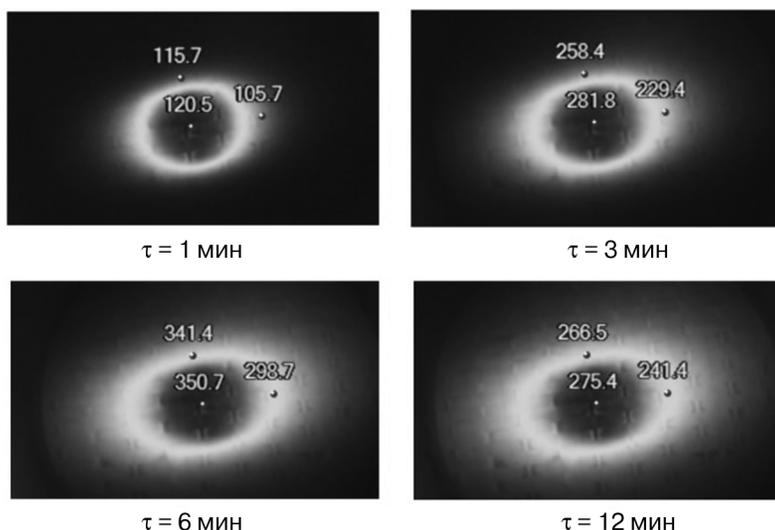
г) обработка экспериментальных данных осуществляется с помощью программы решения нелинейной нестационарной коэффициентной обратной задачи





**Рис. 2.** Общий вид установки

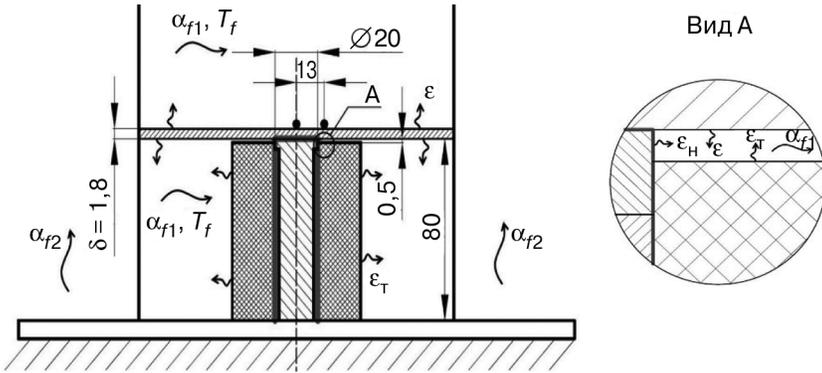
**3. Проведение тепловых испытаний и обработка результатов.** Время эксперимента составляет от 5 до 30 мин, в зависимости от скорости нагрева и максимальной допустимой температуры до которой исследуемый материал сохраняет свою нормальную работоспособность. Для предотвращения передачи тепла через теплоизоляцию между поверхностью образца и изоляционным материалом создан зазор толщиной 0,5 мм. Контакты между нагревателем и теплоизоляцией, также между стержневым элементом нагревателя и образцом считаются идеальными. Весь процесс нагрева регистрируется с помощью тепловизора (рис. 3), а полученные первичные данные оцифровываются для последующей обработки с помощью программы решения ОЗТ. Рассматривая изображения (см. рис. 3) можно наблюдать характерную картину влияния анизотропии теплопроводности образца из однонаправленного углепластика на температурное поле.



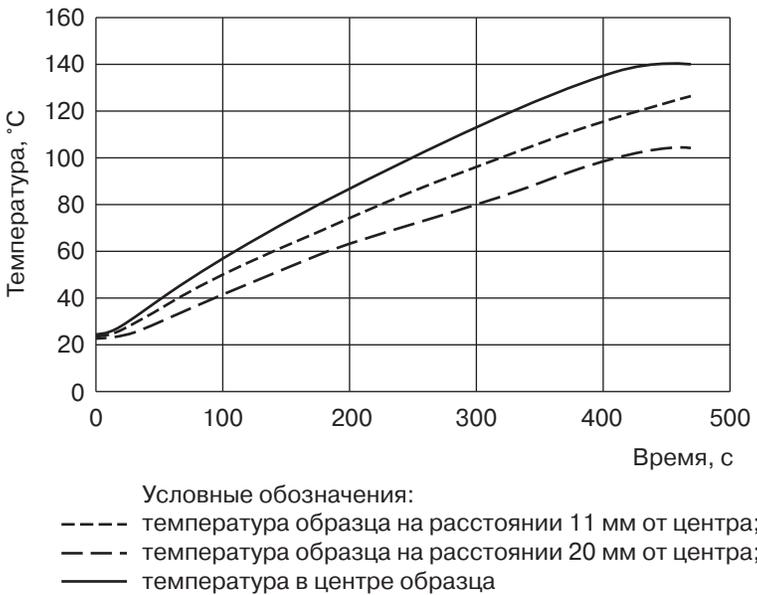
**Рис. 3.** Изображения распределение температуры на поверхности в различные моменты времени, полученные с помощью тепловизора

Температура нагревателя, расположенного под образцом, измеряется с помощью термопар, установленных внутри нагревателя.

Обработка экспериментальных данных в ОЗТ проводится по модели (рис. 4). Для решения ОЗТ используются значения температуры в трех точках на поверхности образца (рис. 5).



**Рис. 4.** Физическая модель эксперимента:  $\alpha_{f1}$ ,  $\alpha_{f2}$  — коэффициент теплоотдачи внутри камеры и снаружи соответственно;  $\epsilon$ ,  $\epsilon_n$ ,  $\epsilon_r$  — коэффициенты излучения поверхности образца, нагревателя и теплоизоляции соответственно;  $T_f$  — температура окружающей среды;  $\delta$  — толщина образца



**Рис. 5.** Типичные экспериментальные термограммы в трех точках на поверхности образца

Две точки — в центре образца и отстоящая от него на 26 мм использовались для задания граничных условий первого рода. Точка, лежащая в 13 мм от центра, служит для формирования квадратичного функционала невязки, для решения задачи методом сопряженных градиентов. Задавая начальное значение теплопроводности  $\lambda_0$  по модели (см. рис. 4) рассчитывается температура  $T(\tau)$ , после чего полученные значения сравниваются с температурой, измеренной тепловизором.

## ВЫВОДЫ

Разработана методика для определения теплопроводности КМ в плоскости армирования с применением бесконтактных средств измерения температуры и использованием в качестве образцов элементов натуральных конструкций.

Методика позволяет значительно упростить и ускорить процесс исследования характеристик новых КМ, дает возможность избавиться от необходимости создания масштабных моделей конструкций для уточнения характеристик материала. Благодаря тепловизионным изображениям за одно испытания возможно определить теплопроводности в любом направлении в плоскости армирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Никольский В.В.* Проектирование сверхмалых космических аппаратов: учеб. пособие. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2012. 59 с.
- [2] *Макриденко Л.А., Боярчук К.А.* Микроспутники. Тенденция развития. Особенности рынка и социальное значение // Вопросы электромеханики. 2005. Т. 102. С. 12—27.
- [3] Рыночный прогноз по эксплуатации микроспутников [Электронный ресурс]. Атланта: Официальный сайт SpaceWorks. 2017. URL: <http://spaceworksforecast.com/2017-market-forecast/>
- [4] *Блинов В.Н., Иванов Н.Н., Сеченов Ю.Н., Шалай В.В.* Малые космические аппараты. В 3-х кн. Кн. 3. Миниспутники. Унифицированные космические платформы для малых космических аппаратов: справочное пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. 348 с.
- [5] *Клименко Г.К., Ляпин А.А., Марахтанов М.К.* Исследование теплового состояния аккумулятора в рабочем цикле // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 10. С. 1—11.
- [6] *Михайловский К.В., Просунцов П.В., Резник С.В.* Разработка высокотеплопроводных полимерных композиционных материалов для космических конструкций // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия. «Машиностроение». 2012. № 9. С. 98—106.
- [7] Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Взгляд в будущее. В 3-х т. Том 3. Экспериментальные исследования / под ред. Ю.В. Полежаева и С.В. Резника. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 264 с.
- [8] *Алифанов О.М.* Обратные задачи теплообмена. М.: Машиностроение, 1998. 280 с.
- [9] *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. литературы, 1979. 284 с.
- [10] *Кабанихин С.И.* Обратные и некорректные задачи: учеб. для студентов высших учебных заведений. Новосибирск: Сибирское науч. изд-во, 2009. 457 с.
- [11] *Сергеев О.А.* Метрологические основы теплофизических измерений. М.: Изд-во стандартов, 1972. 154 с.

© Резник С.В., Просунцов П.В., Денисов О.В.,  
Петров Н.М., Вонхеонг Ли, 2017

### История статьи:

Дата поступления в редакцию: август 2017

Дата принятия к печати: сентябрь 2017

### Для цитирования:

**Резник С.В., Просунцов П.В., Денисов О.В., Петров Н.М., Вонхеонг Ли.** Расчетно-экспериментальная методика определения теплопроводности композиционного материала корпуса наноспутника // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: «Инженерные исследования».* 2017. Т. 18. № 3. С. 345—352. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-345-352

**Сведения об авторах:**

*Резник Сергей Васильевич*, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой СМ13 «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана. *Сфера научных интересов*: проектирование производство и испытание конструкций ракетно-космической техники из композиционных материалов. *Контактная информация*: e-mail: sreznik@bmstu.ru

*Просунцов Павел Викторович*, доктор технических наук, профессор кафедры СМ13 «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана. *Сфера научных интересов*: моделирование и идентификация тепловых процессов в конструкциях ракет и космических аппаратов. *Контактная информация*: e-mail: pavel.prosuntsov@mail.ru

*Денисов Олег Валерьевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры СМ13 «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана. *Сфера научных интересов*: теплофизика композиционных материалов и конструкций. *Контактная информация*: e-mail: denisov.sm13@mail.ru

*Петров Никита Михайлович*, аспирант, ассистент кафедры СМ13 «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана. *Сфера научных интересов*: расчетно-экспериментальные исследования теплофизических характеристик композиционных материалов. *Контактная информация*: e-mail: avpdrago@gmail.com

*Вонхеонг Ли*, бакалавр, студент кафедры СМ13 «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана. *Сфера научных интересов*: расчетно-экспериментальные исследования теплофизических характеристик композиционных материалов.

## **NANOSATELLITE BODY COMPOSITE MATERIAL THERMAL CONDUCTIVITY DETERMINATION COMPUTATIONAL AND THEORETICAL METHOD**

**S.V. Reznik, P.V. Prosuntsov, O.V. Denisov, N.M. Petrov, Vonheong Lee**

Bauman Moscow State Technical University  
(National Research University of technology)  
2-nd Baumanskaya str., 5/1, Moscow, Russia, 105005

In this paper, we present a technique for determining the thermal conductivity of an anisotropic composite material (CM) of a body of nanosatellite on a contact heating installation. A description is given of the technique of a thermal physics experiment with CM samples in the form of thin-walled plates, which were parts of the body of nanosatellite.

**Key words:** nanosatellite, composite materials, carbon fiber reinforced plastic, anisotropy of thermal conductivity, math modeling, thermal imaging measurements, inverse heat conduction problem

### **REFERENCES**

- [1] Nikolskii V.V. Designing of ultra-small spacecrafts: training manual. Saint-Petersburg: Baltic State Technical University, 2012. (In Russ).
- [2] Makridenko L.A., Boyarchuk K.A. Microsatellites. Development trend. Market features and social significance. *Voprosy elektromekhaniki*. 2005. Vol. 102. P. 12–27.
- [3] [paceworksforecast.com](http://paceworksforecast.com) [Internet]. Atlanta: The market forecast for the operation of microsatellites, [updated 2017 July 25]. Available from: <http://paceworksforecast.com/2017-market-forecast/>

- [4] Blinov V.N., Ivanov N.N., Sechenov Yu.N., Shalai V.V. Small space vehicles. In 3 books. Book 3 Minisatellite. Unified space platforms for small space vehicles: reference book. Omsk: Publishing office OmSTU, 2010. (In Russ).
- [5] Klimenko G.K., Lyapin A.A., Marakhtanov M.K. The study of the thermal state of the battery in the working cycle. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2013. No. 10. P. 1—11.
- [6] Mikhailovskii K.V., Prosuntsov P.V., Reznik S.V. Development of high-conductivity polymer composite materials for space structures. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya «Mashinostroenie»*. 2012. No. 9. P. 98—106.
- [7] Materials and coatings under extreme conditions. A look into the future. In 3 volumes. Vol. 3. Experimental studies ed. Polezhaev Yu.V., Reznik S.V. Moscow: Publishing office BMSTU, 2002. (In Russ).
- [8] Alifanov O.M. Inverse heat transfer problems. Moscow: Mashinostroenie, 1998. (In Russ).
- [9] Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. Methods for solving incorrect problems. Moscow: Science. Main edition of physical and mathematical literature, 1979. (In Russ).
- [10] Kabanikhin S.I. Inverse and incorrect problems: Textbook for students of higher educational institutions. Novosibirsk: Siberian Scientific Publishing House, 2009. (In Russ).
- [11] Sergeev O.A. Metrological basis of thermophysical measurements. Moscow: Publishing house of standards, 1972. (In Russ).

#### Article history:

Received: August 2017

Accepted: September 2017

#### For citation:

**Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Denisov O.V., Petrov N.M., Vonheong Lee. (2017) Nanosatellite body composite material thermal conductivity determination computational and theoretical method. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(3), 345—352. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-345-352**

#### Bio Note:

*Reznik Sergey Vasilyevich*, Doctor of Technical Sciences, professor, head of the department SM13 “Rocket and space composite structures” of the Bauman Moscow State Technical University. *Research interests*: design, producing and testing of rocket and space composite structures. *Contact information*: e-mail: sreznik@bmstu.ru

*Prosuntsov Pavel Viktorovich*, Doctor of Technical Sciences, professor of the department SM13 “Rocket and space composite structures” of the Bauman Moscow State Technical University. *Research interests*: modeling and identification of thermal processes in rocket and spacecraft structures. *Contact information*: e-mail: pavel.prosuntsov@mail.ru

*Denisov Oleg Valeryevich*, Candidate of Technical Sciences, associate professor of the department SM13 “Rocket and space composite structures” of the Bauman Moscow State Technical University. *Research interests*: thermal physics of composite materials and structures. *Contact information*: e-mail: denisov.sm13@mail.ru

*Petrov Nikita Mikhailovich*, post graduate student, assistant professor of the department SM13 “Rocket and space composite structures” of the Bauman Moscow State Technical University. *Research interests*: calculation and experimental studies of the thermal-physical characteristics of composite materials. *Contact information*: e-mail: avpdrago@gmail.com

*Vonheong Lee*, bachelor, student of the department SM13 “Rocket and space composite structures” of the Bauman Moscow State Technical University. *Research interests*: calculation and experimental studies of the thermal-physical characteristics of composite materials.



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-353-360

УДК 553.3/.4+549.02

## СУЛЬФИДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ РУД УРАН-МОЛИБДЕН-РЕНИЕВОГО БРИКЕТНО-ЖЕЛТУХИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ПОДМОСКОВНЫЙ БАССЕЙН)

П.Э. Кайлачаков

Российский университет дружбы народов  
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198  
Институт геологии рудных месторождений, петрографии,  
минералогии и геохимии Российской академии наук  
Старомонетный пер., 35, Москва, Россия, 119017

В статье приведены новые данные по минералогии руд U-Mo-Re Брикетно-Желтухинского месторождения, залегающего в терригенных породах; детально изучены сульфиды, представленные в основном пиритом. Установлены ранее неизвестные минеральные формы — селенистая разновидность пирита и селенид железа — джаркениит, а также халькопирит.

**Ключевые слова:** геология рудных месторождений, Подмосковский бассейн, сульфиды, рений, уран, молибден

### Введение

Как известно, в СССР добыча рения производилась в Казахстане из медистых песчаников Джекказганского месторождения, а также в Узбекистане и Армении — на медно-молибденовых месторождениях. После распада СССР возникла необходимость восстановления и развития добычи этого редкого (кларк Re  $1 \cdot 10^{-7}\%$ ) и остродефицитного элемента, поскольку для удовлетворения нужд промышленности Россия вынуждена импортировать рений [1].

Одним из источников рения являются гидрогенные месторождения урана песчаникового типа (по классификации МАГАТЭ), где рений добывается как компонент сопутствующий урану, методом скважинного подземного выщелачивания [2].

В ходе оценочных работ с 2013 по 2015 гг., проводимых ФГУП «ИМГРЭ» (с участием автора), было открыто, и в 2016 г. впервые в стране поставлено на баланс, месторождение рения — гидрогенное уран-молибден-рениевое Брикетно-Желтухинское месторождение в Рязанской области [3].

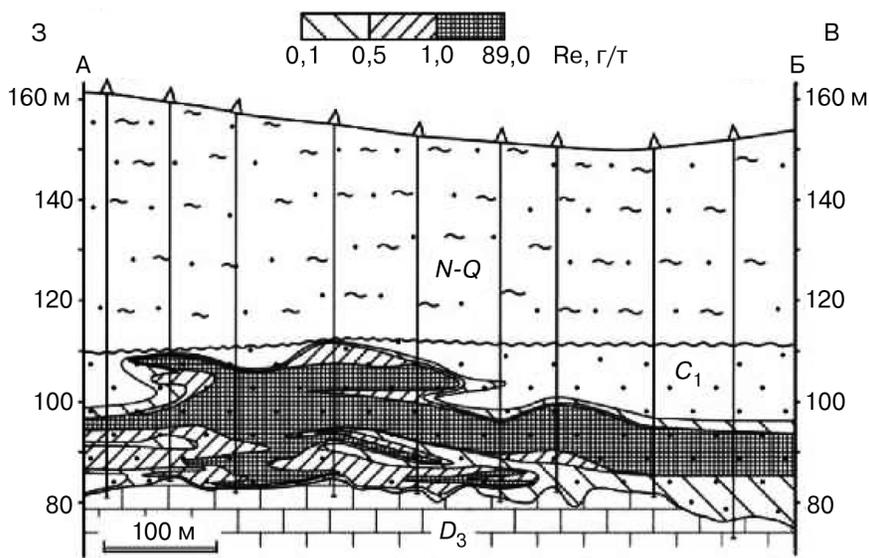
Данное месторождение имеет выгодную географическую позицию для дальнейшей эксплуатации. Оно расположено в Скопинском районе Рязанской области в 16 км от Скопинского гидрометаллургического завода, ныне не работающего, где по проекту «Гиредмета» предполагается организовать производство рения. По площади месторождения проходит федеральная трасса М6 «Каспий». В непосредственной близости от объекта проходят высоковольтная линия электропередач и железнодорожная ветка Узловая — Ряжск.

### Геологическое строение месторождения

Рениевое оруденение на Брикетно-Желтухинском месторождении локализовано в палеорусловых песчаных отложениях бобриковского горизонта каменноугольного возраста, залегающих на известняках и перекрытых более молодыми неоген-четвертичными песками и глинами мощностью 40–50 м. Рудоносная толща представлена мелко-среднезернистыми аллювиальными кварцевыми песками, обогащенными органическим детритом и содержащими рассеянные скопления сульфидов. Весь разрез этой толщи характеризуется содержаниями  $Re > 0,01$  г/т. Максимальные содержания  $Re$  зафиксированы в пропластках угля и глин (10–89 г/т). В песках содержания  $Re$  достигают 10–50 г/т (рис. 1) [4; 5].

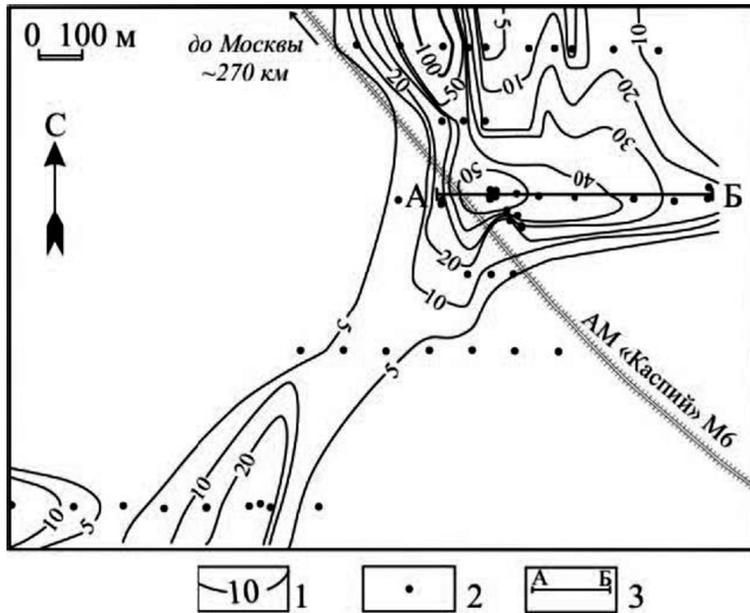
По результатам бурения оценочных скважин в пределах изученной площади было выделено единое рудное тело с содержанием  $Re > 0,1$  г/т, площадная продуктивность  $Re$  достигает  $57$  г/м<sup>2</sup>. Мощность рудной залежи достигает 30 м, поперечный размер — до 500 м (рис. 2). Подрудная карбонатная толща сложена чередованием пачек темно-серых известняков с прослоями глин и мергелей, между которыми в ряде случаев отмечаются постепенные переходы. Карбонатная толща представляет собой известняки, местами магнезиальные. В них также встречается сульфидная минерализация в виде тонких прослоек, примазок по напластованию и зеркалам скольжения [4].

Установлено два типа рудоносных пород, содержащих оруденение: первый тип — алевропесчаные разности, обогащенные сульфидами, второй тип — угли, также содержащие сульфиды. Логично полагать, что рений и другие рудные элементы (уран, молибден) ассоциируют либо с сульфидами, либо с органическим веществом пород.



**Рис. 1.** Re-содержащие пески в разрезе Брикетно-Желтухинского месторождения [4]:  
*N-Q* — перекрывающие глины и пески; *C<sub>1</sub>* — рудовмещающие пески;  
*D<sub>3</sub>* — подстилающие известняки; А, Б — отметки на плане (рис. 2)

**[Fig. 1.** Re-containing sands in the cross-section of Briketno-Zheltukhinskoye deposit [4]:  
*N-Q* — overlying clay and sands; *C<sub>1</sub>* — ore-bearing sands;  
*D<sub>3</sub>* — underlying limestones; А, Б — mark on the plan Fig. 2]



**Рис. 2.** План площадной продуктивности Брикетно-Желтухинского месторождения [4]:  
 1 — изолинии площадной продуктивности ренийевых рудных тел ( $Re$ , г/м<sup>2</sup>);  
 2 — скважины; 3 — линия разреза рис. 1

**[Fig. 2.** Plan of areal productivity of Briketno-Zheltukhinskoe deposit [4]:  
 1 — isolines of areal productivity of rhenium ore bodies ( $Re$ , g/m<sup>2</sup>);  
 2 — boreholes; 3 — section line Fig. 1]

### Минеральный состав

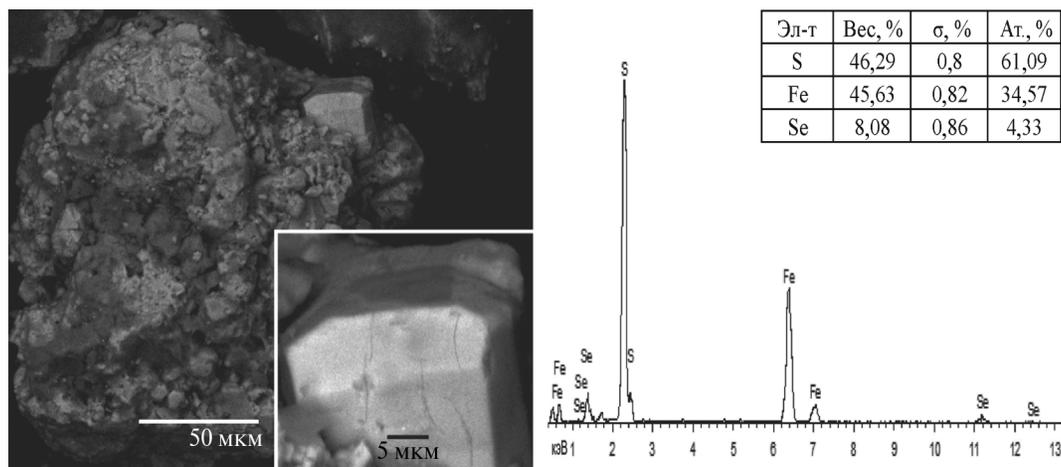
Изучение песчаных и алевропесчаных пород под бинокляром показало, что зерна представлены преимущественно кварцем (80—90 об.%). Представительные пробы рудоносных песков были расситованы на гранулометрические фракции. Минералы тяжелой фракции представлены преимущественно цирконом, ильменитом, монацитом, рутилом, второстепенные — сульфидами (в основном пирит).

Ранее присутствие рения в сульфидах было установлено, в частности, на Бельском уран-молибден-ренийевом месторождении в Тверской области [6], также приуроченном к угленосным отложениям нижнего карбона Подмосковского угленосного бассейна. По литературным данным примесь рения известна в молибдените и сульфидах меди. Рений может накапливаться в органическом веществе углей, в рассеянном органическом веществе углеродистых сланцев, в нефтях и битумах.

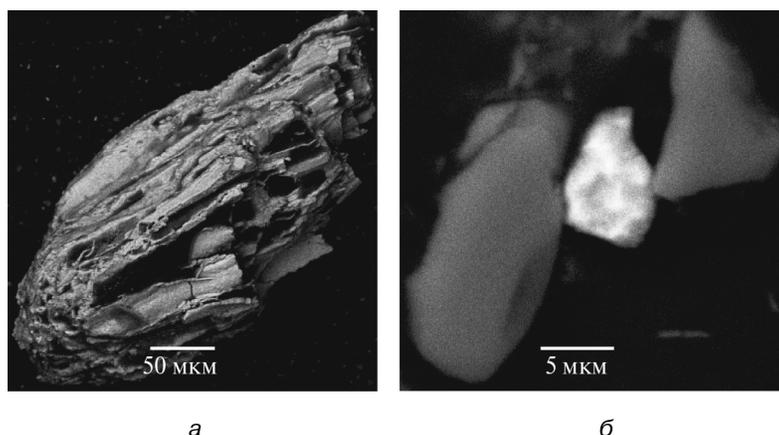
Для исследований взята гранулометрическая фракция рудоносных песков размером  $-0,25$ — $+0,1$ . После выделения сульфидов с помощью тяжелых жидкостей из слабоэлектромагнитной фракции и проб исходных песков сделаны запрессовки. Сульфиды изучены методом аналитической сканирующей электронной микроскопии (АСЭМ) на микроскопе JSM-5610 с аналитическим энергодисперсионным спектрометром в ИГЕМ РАН [7].

Установлено несколько форм пиритовых образований. В изученной фракции преобладает массивный кристаллически-зернистый пирит, нередко цементиру-

ющий кристаллы кварца и пирита. Также отмечена примесь селена в составе пирита (до 8 мас.%) (рис. 3). Часто встречаются фрамбоиды пирита (3—8 мкм), эпизодически встречаются пиритизированные органические остатки трубчато-волокнистой формы (ископаемая флора?) с углеродистым веществом (рис. 4, а). Редко встречаются очень мелкие обломки халькопирита (рис. 4, б).



**Рис. 3.** Кристалл пирита с примесью селена в агрегате пирита с примазками алюмосиликатов. Справа — спектр состава и результат анализа (здесь и далее микрофотографии BSE) [Fig. 3. Crystal of pyrite with admixture of selenium in the aggregate of pyrite with adhesions of aluminosilicates. Right — spectrum of the composition and the result of the analysis (hereinafter micrographs BSE)]

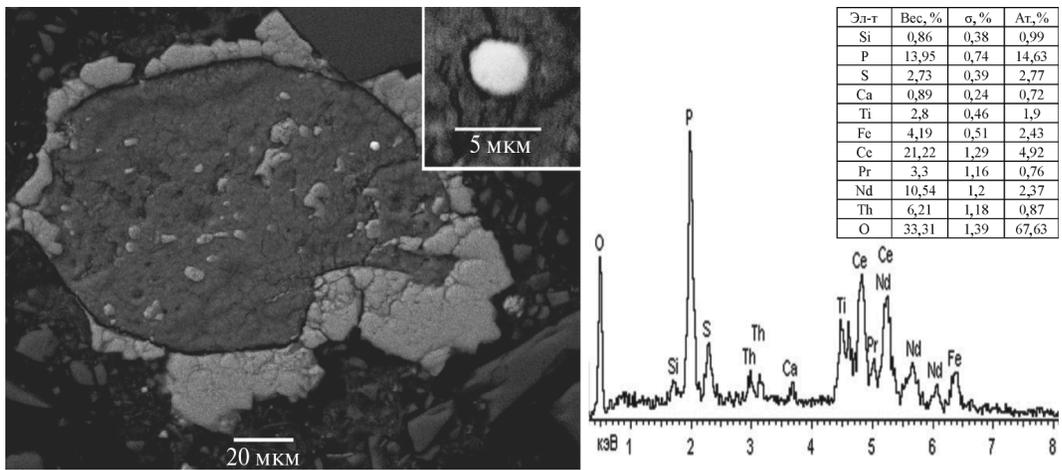


**Рис. 4.** Формы пиритовых образований: а — пористый агрегат пирита трубчато-волокнистого строения; б — халькопирит (светлое) между обломков алюмосиликатов [Fig. 4. Forms of pyrite formations: a — porous aggregate of pyrite with tubular fibrous structure; b — chalcopyrite (light) between the fragments of aluminosilicates]

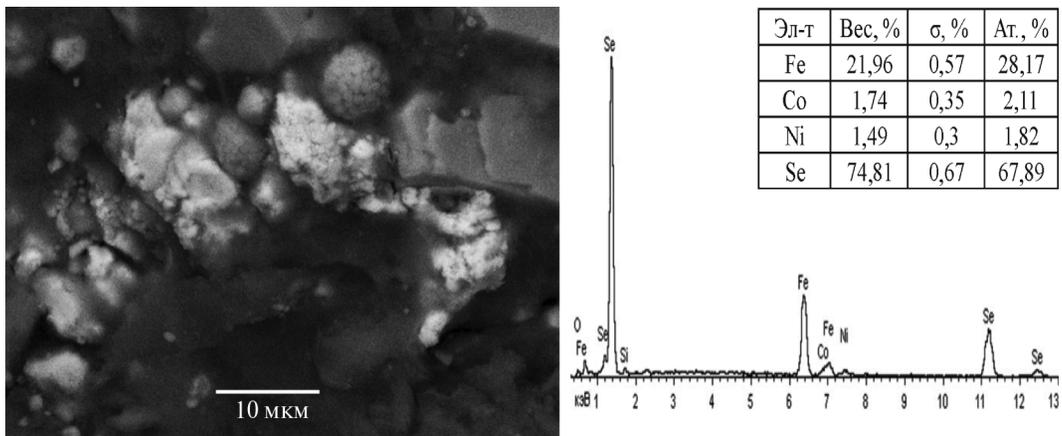
Следует отметить находку фосфата церия (моноцит — предположительная диагностика) в виде округлого включения на поверхности измененного ильменита (рис. 5). В его составе, помимо редкоземельных элементов, отмечено до 6 мас.% тория.

В представительных рудных пробах песков установлена ранее неизвестная на данном месторождении минеральная форма селена — селенид железа — джарке-

нит с идеализированной формулой  $FeSe_2$  (рис. 6). В составе минерала отмечены примеси кобальта (до 2 мас.%) и никеля (до 1,6 мас.%). Расчет анализов состава привел к формуле  $(Fe_{0,85}Co_{0,06}Ni_{0,05})_{0,96}Se_{2,04}$ .



**Рис. 5.** Окатанное зерно ильменита с пиритовой каемкой. Яркое микровключение — моноцит.  
Справа — спектр состава и результат анализа  
[Fig. 5. Rounded ilmenite grain with pyrite rim. Bright microinclusion — monozite.  
Right — spectrum of the composition and the result of the analysis]



**Рис. 6.** Джаркениит (яркое) в ассоциации с пиритом (серое); в верхней части снимка — фрамбоид пирита. Справа — спектр состава и результат анализа джаркениита  
[Fig. 6. Dzharkenite (bright) in association with pyrite (grey); Framboids of pyrite is in the upper part of the image. Right — spectrum of the composition and the result of the analysis dzharkenite]

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования дополнены данные о сульфидной минерализации руд U-Mo-Re Брикетно-Желтухинского месторождения, в основном представленной пиритом. Встречены различные морфологические типы пирита: кристаллы и зернистые массы, фрамбоиды, трубчато-волокнистые псевдоморфозы по ископаемой древесине. Впервые, для данного месторождения,

установлены минералы джаркениит ( $\text{FeSe}_2$ ), халькопирит и селенистый пирит (7,7—8,1 мас.%). Минерал джаркениит является носителем кобальта (1—2 мас.%) и никеля (1—1,6 мас.%). Для обнаружения молибденовой и рениевой минерализации предполагается дальнейшее изучение скоплений углистого детрита.

#### **Благодарности и финансирование**

Автор выражает благодарность С.А. Карасю и А.А. Кременецкому за организацию полевых работ и помощь, особую признательность руководству ФГУП «ИМГРЭ» за предоставление материала. Также весьма признателен О.А. Дойниковой (ИГЕМ РАН) за проделанную работу на АСЭМ и научному руководителю И.В. Викентьеву (ИГЕМ РАН) за неоценимую помощь и советы при планировании исследования и рекомендации по оформлению статьи.

Работа выполнена по базовой теме ИГЕМ РАН, регистрационный номер 0136-20140010.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- [1] Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л., Викентьев И.В., Аристов В.В., Лаломов А.В., Мурашов К.Ю. Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы развития // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58. № 2. С. 97—119.
- [2] Культин Ю.В., Новгородцев А.А., Фоменко А.Е., Васюта О.Н., Алтунин О.В. Оценка возможности разработки комплексного уран-молибден-рениевого месторождения способом подземного выщелачивания // Горный журнал. 2007. № 6. С. 47—51.
- [3] Спиридонов И.Г., Килипко В.А., Левченко Е.Н., Ключарев Д.С. Основные задачи геохимического картирования и поиски новых источников нетрадиционного редкометалльного сырья // Разведка и охрана недр. 2016. № 9. С. 115—122.
- [4] Карась С.А., Культин Ю.В., Кременецкий А.А., Орлов С.Ю., Шлычкова Т.Б., Кайлачаков П.Э. Новый геолого-промышленный тип гидрогенных рениевых месторождений: геологическое строение и технология подземного выщелачивания // Тр. межд. конф. «Рений, вольфрам, молибден-2016. Научные исследования, технологические разработки, промышленное применение». М.: Гинцветмет, 2016. С. 78—82.
- [5] Кайлачаков П.Э. Особенности геологического строения редкометалльного Брикетно-Желтухинского месторождения // XXIX Межд. научно-практ. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты». Новосибирск, 2016. С. 24—29.
- [6] Кременецкий А.А., Лунева Н.В., Куликова И.М. Бельское Re-Mo-U месторождение: минералого-геохимические особенности, условия формирования, технология извлечения рения // Разведка и охрана недр. 2011. № 6. С. 33—40.
- [7] Дойникова О.А. Минералогия урана восстановительной зоны гипергенеза (по данным электронной микроскопии). М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 215 с.

© Кайлачаков П.Э., 2017

#### **История статьи:**

Дата поступления в редакцию: май 2017

Дата принятия к печати: сентябрь 2017

#### **Для цитирования:**

Кайлачаков П.Э. Сульфидная минерализация руд уран-молибден-рениевого брикетно-желтухинского месторождения (подмосковный бассейн) // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: «Инженерные исследования».* 2017. Т. 18. № 3. С. 353—360. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-353-360

**Сведения об авторе:**

*Кайлачаков Платон Эдуардович*, ведущий инженер. Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук. *Сфера научных интересов*: геология рудных месторождений, геохимия, минералогия, редкие элементы. *Контактная информация*: e-mail: KPlaton@yandex.ru

## **SULFIDE ORE MINERALIZATION OF THE URANIUM-MOLYBDENUM-RHENIUM BRIKETNO-ZHELTUKHINSKOE DEPOSIT (MOSCOW BASIN)**

**P.E. Kaylachakov**

Peoples' Friendship University of Russia  
*Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198*  
Institute of Ore Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry,  
Russian Academy of Science  
*Staromonetny per., 35, Moscow, Russia, 119017*

The article presents new data on mineralogy of the ores of U-Mo-Re Briketno-Zheltukhinskoe Deposit hosted in terrigenous rocks. Sulfides, mainly presented by pyrite, have been studied. Previously unknown mineral forms, such as Se-pyrite, iron selenide — dzharkenite and chalcopyrite, have been found.

**Key words:** Geology of ore deposits, Moscow basin, sulfides, rhenium, uranium, molybdenum

### **REFERENCES**

- [1] Bortnikov N.S., Volkov A.V., Galyamov A.L., Vikent'ev I.V., Aristov V.V., Lalomov A.V., Murashov K.Y. Mineral resources of high-tech metals in Russia: State of the art and outlook. *Geology of Ore Deposits*. 2016. Vol. 58. No. 2. P. 83—103.
- [2] Kul'tian Yu.V., Novgorodtsev A.A., Fomenko A.E., Vasyuta O.N., Altunin O.V. Estimation of possibility of development of complex uranium-molybdenum-rhenium deposit via underground leaching. *Mining journal*. 2007. No. 6. P. 47—51.
- [3] Spiridonov I.G., Kilipko V.A., Levchenko E.N., Klyucharev D.S. The main goals of geochemical mapping and a search of non-conventional sources of rare metal raw materials. *Exploration and protection of mineral resources*. 2016. No. 9. P. 115—122.
- [4] Karas S.A., Kremenetskiy A.A., Orlov S.Yu., Kultin Yu.V., Shlychkova T.B., Kaylachakov P.E. New geological-industrial type hydrogenous rhenium deposits: Geology and ISL mining technology. *Trudy mezhd. Conf. "Rhenium, tungsten, molybdenum-2016. Scientific research, technological development, industrial application"*. M.: Gintsvetmet, 2016. P. 78—82.
- [5] Kaylachakov P.E. Features of the geological structure metal Briketno-Zheltukhinskoe deposit. XXIX international scientific-practical conference "Fundamental and applied researches: challenges and results". Novosibirsk, 2016. P. 24—29.
- [6] Kremenetskiy A.A., Luneva N.V., Kulikova I.M. Belskoe Re-Mo-U deposit: mineralogical and geochemical characteristics, conditions of formation, technology of rhenium extraction. *Exploration and protection of mineral resources*. 2011. No. 6. P. 33—40.
- [7] Doynikova O.A. The Mineralogy of the uranium recovery zone of hypergenesis (according to electron microscopy). M.: FIZMATLIT, 2012. 215 p.

**Article history:**

Received: May 2017

Accepted: September 2017

**For citation:**

Kaylachakov P.E. (2017) Sulfide ore mineralization of the uranium-molybdenum-rhenium briketno-zheltukhinskoe deposit (moscow basin). *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(3), 353–360. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-353-360

**Bio Note:**

*Kaylachakov Platon Eduardovich*, Institute of Ore Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Science. *Research interests*: Geology of ore deposits, Geochemistry, Mineralogy, Rare elements. *Contact information*: e-mail: KPlaton@yandex.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-361-372

УДК 629.78

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КОРРЕКЦИИ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕЙ ОРБИТЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

К.В. Михайловский, М.А. Городецкий

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)  
2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, Москва, Россия, 105005

Предложена методика комплексного анализа характеристик орбит, используемых для космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Приведены результаты математического моделирования условий функционирования подобных КА. Методика апробирована с учетом входных параметров орбиты КА — «БелКА». Методика будет полезна при определении комплекса орбитальных характеристик КА ДЗЗ на этапе технических предложений.

**Ключевые слова:** космические аппараты дистанционного зондирования Земли, солнечно-синхронная орбита, расчет, определение параметров

**Введение.** Одной из наиболее важных задач Федеральной космической программы России на период до 2025 г. является создание космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Неотъемлемой частью проектирования системы ДЗЗ считается определение параметров орбит, которые наиболее эффективны с позиций информативности, энергообеспечения и длительности активного существования КА. Разнообразные и многочисленные исследования в данной области проводятся в нашей стране и за рубежом; их результаты обобщены в ряде изданий [1–10].

Так в работе [6] рассмотрен подход к выбору технических параметров корректирующей двигательной установки КА ДЗЗ, исходя из характеристик съемочной аппаратуры, системы ориентации и требуемого срока активного существования КА, но не решается проблема видимости пункта приема информации (ППИ) и целевых задач использования КА ДЗЗ. В труде [7] представлен анализ параметров орбит КА ДЗЗ для обеспечения хорошего покрытия ближневосточных территорий, однако нет практических рекомендаций для анализа орбитальных параметров. В издании [8] показаны возможности расчета движения КА с использованием специализированного программного обеспечения моделирования траекторных параметров. В работах [9; 10] приведены современные подходы к более точному моделированию отдельных траекторных параметров движения КА.

Стоит отметить, что в области расчета характеристик орбит КА ДЗЗ еще имеются пробелы в части комплексного анализа характеристик орбит, актуализирующих разработку соответствующей методики.

Цель настоящей работы заключается в формировании универсальной методики, позволяющей на ранних стадиях проектирования достаточно быстро и одновременно точно проводить расчетные оценки параметров орбит КА ДЗЗ и анализировать условия их коррекции для поддержания этих параметров.

Методика включает в себя: оценку максимального времени нахождения КА в зоне видимости ППИ и оценку зон видимости; обеспечение постоянства солнечной освещенности и возможности проведения наблюдений путем использования солнечно-синхронной орбиты (ССО); обеспечение видимости земной поверхности в заданное время полета КА, путем выполнения условий кратности орбит; оценку углового размера теневого участка орбиты; построение трассы полета КА и определение максимального просвета между географическими долготами восходящих узлов орбиты в зависимости от высоты; анализ влияния земной атмосферы на орбитальное движение КА; моделирование коррекций поддержания высоты орбиты с учетом атмосферного торможения КА.

Для решения этих задач в рамках методики построена математическая модель условий функционирования КА ДЗЗ в целях анализа освещенности и видимости, кратности, покрытия земной поверхности трассами полета. При расчетах учтено воздействие атмосферы на орбитальное движение и выполнена коррекция поддержания высоты орбиты. Расчет выполнен с помощью программного обеспечения MatLab. Апробация методики проведена для КА «БелКА» [11].

**Задача определения наклона орбиты в зависимости от высоты.** По замыслу КА «БелКА» выводится на ССО. Далее представлено решение задачи определения зависимости наклона орбиты ( $i$ , град) от высоты ( $H$ , км) и определения значения  $i$  для заданной высоты.

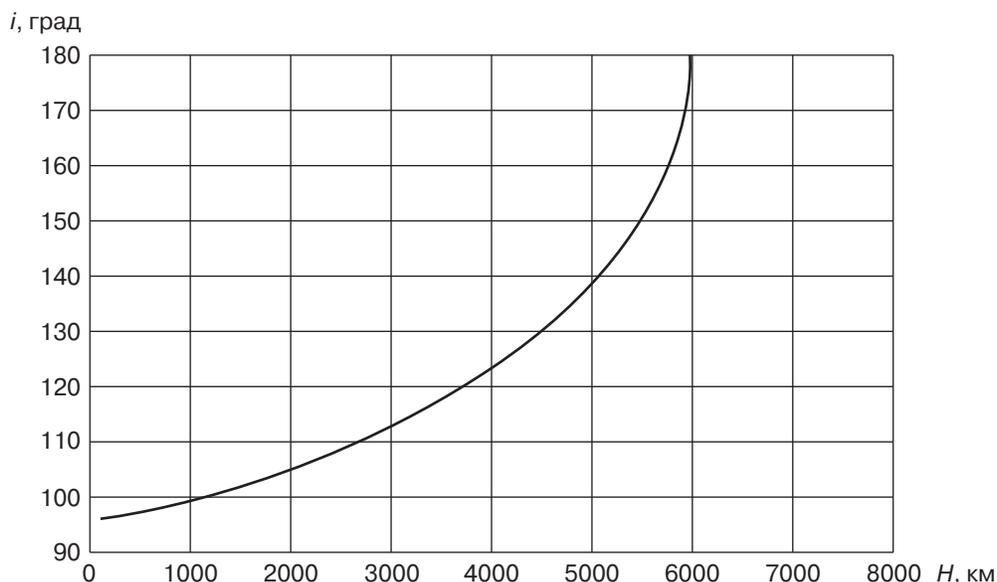


Рис. 1. Зависимость наклона от высоты орбиты

Условие солнечной синхронности:

$$i = \frac{180}{\pi} \left( \pi - \arccos \left( \frac{2\omega_s}{3J_2 \left( \frac{R_e}{R_e + H} \right)^2 \sqrt{\frac{\mu}{(R_e + H)^3}}} \right) \right),$$

где  $\omega_s = 0,2 \cdot 10^{-6}$  — средняя угловая скорость движения Земли вокруг Солнца, рад/с;  $R_e = 6378,14$  — экваториальный радиус Земли, км;  $\mu = 3,99 \cdot 10^5$  — гравитационный параметр Земли, км<sup>3</sup>/с<sup>2</sup>;  $J_2 = 1,08 \cdot 10^{-3}$  — безразмерный коэффициент, характеризующий форму Земли.

Результаты расчета угла  $i$  (зависимость наклона ССО от средней высоты полета КА) показывают, что свойство постоянства условий освещенности КА может быть достигнуто только для орбит, превосходящих по наклону полярные орбиты (рис. 1). В пределах высот полета от 200 км до 2000 км изменение наклона  $i$  составляет от 97 до 105°.

**Построение трассы полета и определение максимального просвета между географическими долготами восходящих узлов ССО.** На примере КА «БелКА» была построена трасса полета, в географических координатах, в виде зависимости  $\varphi(\lambda)$ . Вычисления проводились с помощью системы уравнений:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}; \quad \cos \varphi = \frac{z}{r}; \quad \operatorname{tg} \lambda = \frac{y}{x}; \quad \varphi_1 = \frac{180}{\pi}; \quad \lambda_1 = \frac{180}{\pi}(\lambda - \omega_3 t),$$

где  $\varphi$  — географическая широта, град;  $\lambda$  — географическая долгота, град;  $\omega_3 = 7,3 \cdot 10^{-5}$  — средняя угловая скорость суточного вращения Земли вокруг оси, рад/с;  $r, x, y, z$  — вектор положения в орбитальной геоцентрической системе координат. Зависимость  $\varphi_1(\lambda_1)$  приведена на рисунке 2.

Далее решается задача по графическому построению зависимости максимального просвета между географическими долготами восходящих узлов ССО ( $\lambda$ ) от высоты орбиты на временном интервале  $n$  суток (за целое число витков). Выбраны значения высот в интервале от 500 до 550 км. Строится зависимость максимального просвета от высоты орбиты (рис. 3).

**Определение размера тени.** Зависимость углового размера тени ( $\theta$ , град) определяется с учетом плоскости орбиты ( $\beta$ , град) для заданной высоты.

Изменение половинного размера теневого участка:

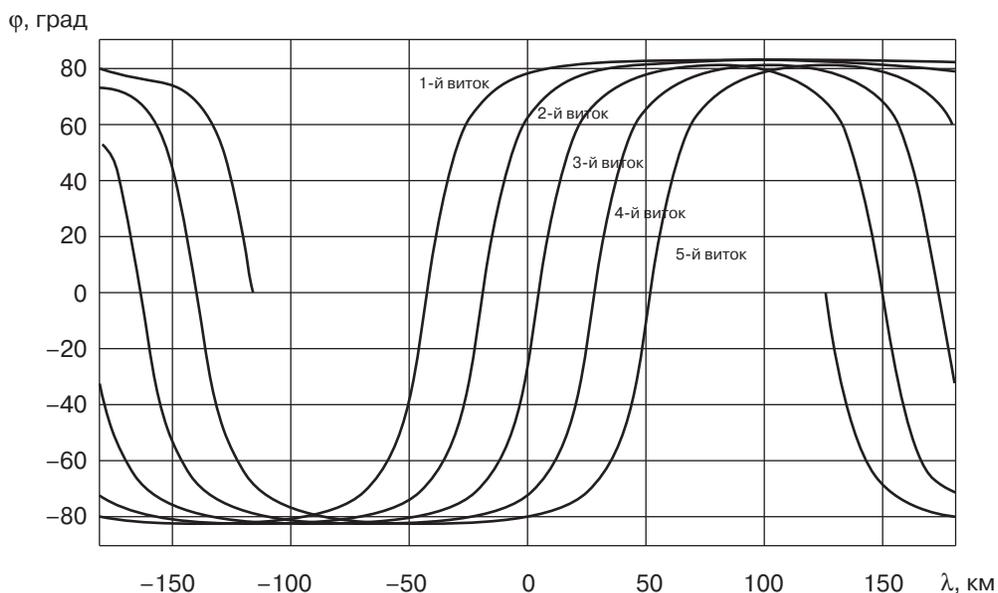
$$\vartheta(\beta) = \frac{180}{\pi} \arccos \frac{\sqrt{2R_e H + H^2}}{(R_e + H) \cos \beta}.$$

На рисунке 4 представлена кривая зависимости углового размера тени от угла наклона солнечных лучей к плоскости орбиты ( $\beta$ ). Значения угла  $\beta$  для орбиты с тенью участком лежат в пределах:

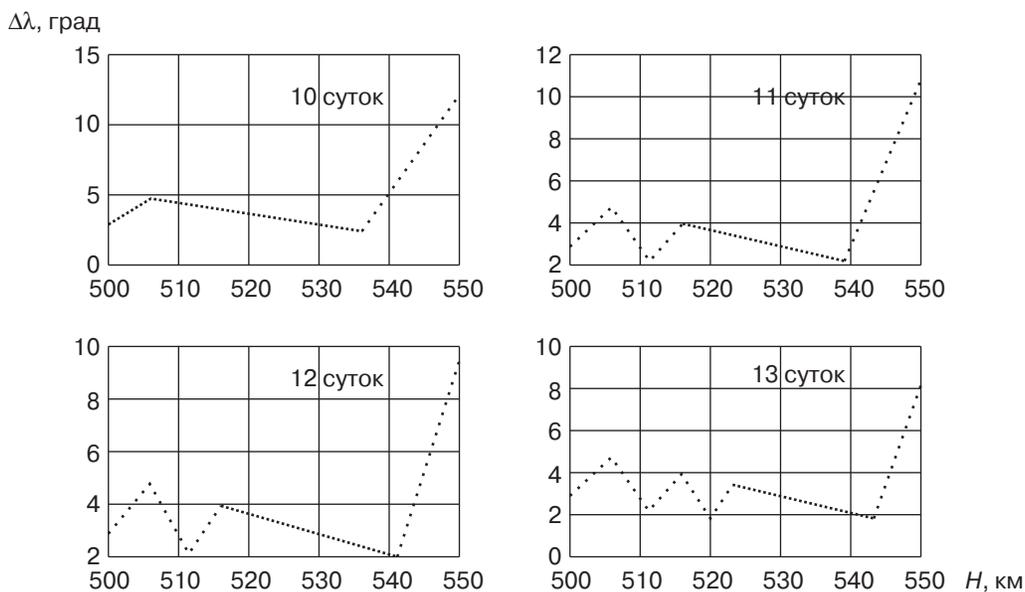
$$0 \leq \beta < \arcsin \frac{R_e}{R_e + H}.$$

Орбиты с углами  $\beta > \arcsin \frac{R_e}{R_e + H}$  являются чисто солнечными, т.е. с отсут-

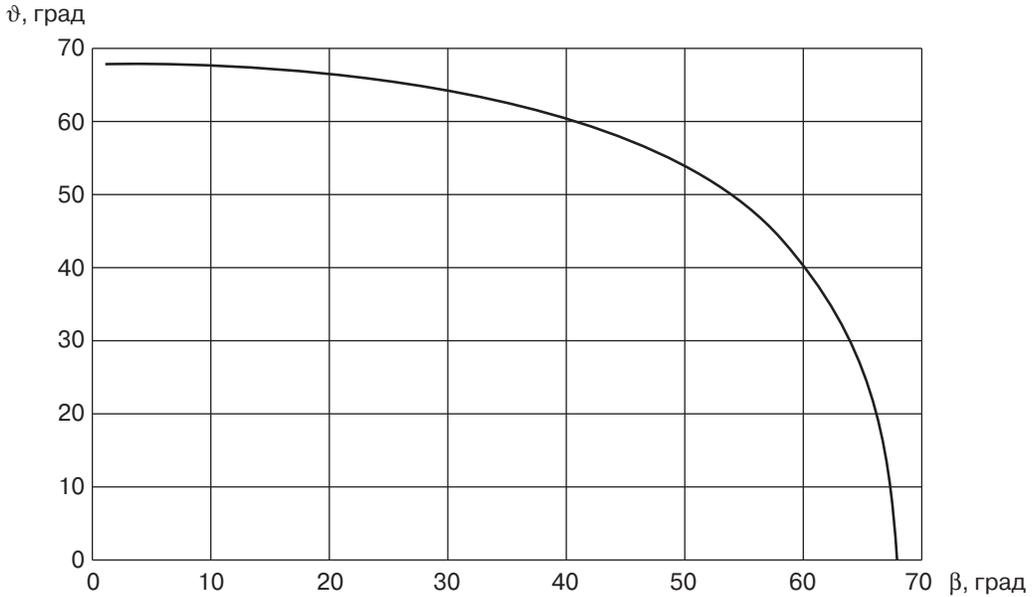
ствием теневого участка. Для высоты орбиты с тенью  $H = 511$  км предельное значение угла  $\beta_{\max} = 67,8^\circ$ .



**Рис. 2.** Трассы полета КА



**Рис. 3.** Максимальное расстояние между трассами полета в зависимости от высоты орбиты



**Рис. 4.** Зависимость между размером тени и углом вектора Солнца к плоскости орбиты

**Оценка максимального времени нахождения КА на круговой орбите в зоне видимости ППИ и определения размера полосы обзора бортовой аппаратуры.** Считается, что в некоторой точке сферической поверхности Земли расположен ППИ. Плоскостью местного горизонта является плоскость, касательная сферической поверхности в данной точке. Зона видимости (обзора) ППИ — это область пространства, в пределах которой с данного пункта виден КА. Практически область «радиовидимости» охватывает не все полусферическое пространство, а некоторую его часть, возвышающуюся над местным горизонтом на минимальный угол возвышения  $\delta = \delta_{\min} = 5\text{—}10^\circ$ . Минимальный угол «радиовидимости» определяется исходя из условий распространения радиоволн и требований приема радиосигналов. Исходные данные: высота орбиты  $H = 511$  км; минимальный угол места  $\delta_{\min} = 5^\circ$ , угол съёмочной аппаратуры КА составляет  $\pm 40^\circ$ . Размером поля зрения аппаратуры можно пренебречь.

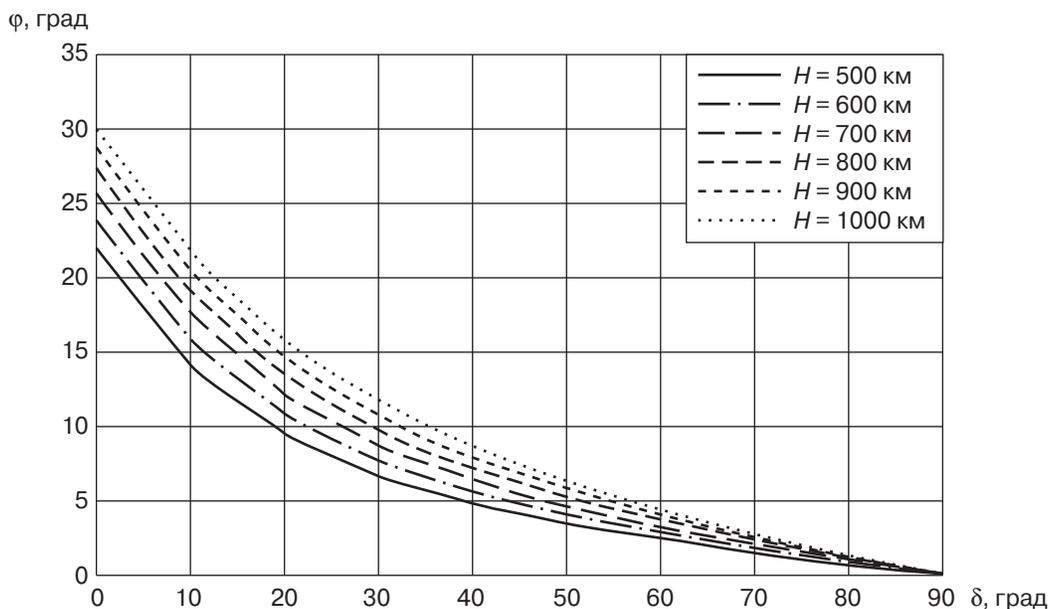
Геоцентрический радиус зоны обзора ППИ ( $\varphi_\delta$ , град) определяется по формуле

$$\varphi_\delta = \frac{180}{\pi} \arccos \left[ \frac{R_e}{R_e + h} \cos \delta_{\min} \right] - \delta_{\min}.$$

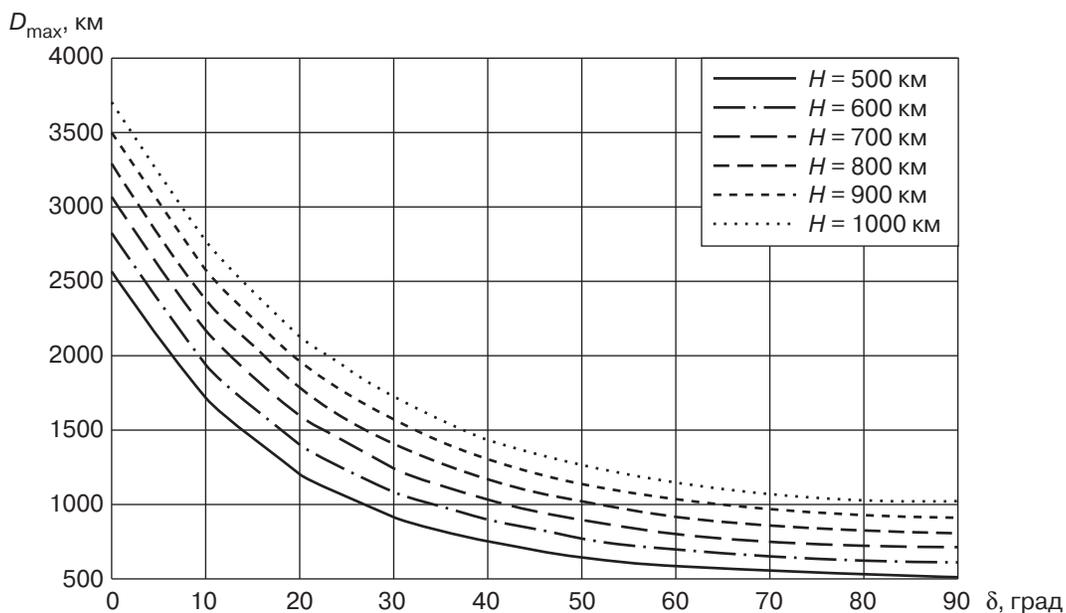
Граница зоны видимости КА с ППИ определяется также (помимо минимального угла радиовидимости) максимальной дальностью связи ( $D_{\max}$ , км), обеспечиваемой аппаратурой ППИ и КА (рис. 5):

$$D_{\max} = \sqrt{(R_e + h)^2 + R_e^2 - 2(R_e + h)R_e \cos \varphi};$$

$$\varphi_D = \frac{180}{\pi} \arccos \left( \frac{R_e}{R_e + h} \cos \delta_D \right) - \delta_D.$$



**Рис. 5.** Зависимость между геоцентрическим угловым радиусом зоны обзора ППИ и углом места для высот 500—1000 км



**Рис. 6.** Зависимость между максимальной дальностью работы антенны ППИ и углом места для высот 500—1000 км

Минимальный угол места, при котором работает антенна ППИ, составляет  $\delta_{\min} = 5^\circ$ . Максимальная дальность, на которой работает антенна, составляет  $D_{\max} = 2100$  км и достигается при значении угла места  $\delta_D \approx 5^\circ$  (рис. 6).

Из рисунка 5 находится соответствующий геоцентрический угол  $\varphi_D \approx 17^\circ$ . Угловая скорость спутника равна  $360^\circ/98$  мин, где за примерный период обращения

КА берется 98 мин. Следовательно, спутник, проходящий через зенит ППИ, будет находиться в зоне радиовидимости примерно  $2 \cdot 17 \cdot 98 / 360 \approx 9$  мин. Если спутник проходит не через зенит ППИ, то время его нахождения в зоне видимости будет меньше.

Рассчитано значение углового радиуса поля обзора по формуле ( $\varphi_\epsilon$ , град)

$$\varphi_\epsilon = \frac{180}{\pi} \arcsin \left[ \left( 1 + \frac{h}{R_e} \right) \sin \epsilon \right] - \epsilon.$$

Линейный размер ( $L$ , км) на поверхности Земли связан с центральным углом  $\varphi^\circ$  соотношением  $L \approx 111\varphi^\circ = \pm 433$  км. Проиллюстрированы границы зоны видимости на примере 3-х пунктов наблюдения, находящихся в городах: Отрадное, Берлин и Хабаровск. Границы зоны видимости для каждого пункта определяются (по времени) с помощью зависимостей:  $\lambda_1(j)$ ,  $\Delta t_1(j)$ ,  $\lambda_2(j)$ ,  $\Delta t_2(j)$  (на восходящей и нисходящей частях витка),  $j$  — количество точек (рис. 7). Определяется время полета ( $\Delta t$ , с) от начала витка до входа в зону видимости и выхода из нее:

$$\Delta t_1 = \frac{u_1}{\omega_{КА}}; \Delta t_2 = \frac{u_2}{\omega_{КА}}; \omega_{КА} = \sqrt{\frac{\mu}{R_e + H}},$$

где  $u_1, u_2$  — аргументы широты прилета в точку на границе зоны видимости на восходящей и нисходящей части витка соответственно, град;  $\omega_{КА}$  — угловая скорость КА, град.

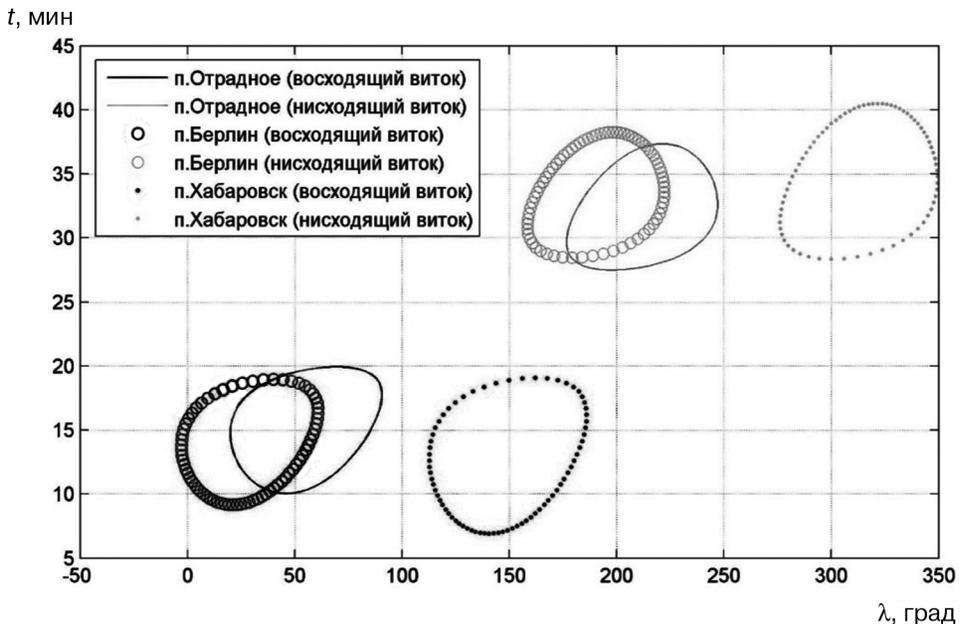


Рис. 7. Зоны радиовидимости ППИ на восходящем и нисходящем витках

Географическая долгота восходящего узла витка, проходящего через точку на границе зоны видимости:

$$\lambda_1 = \lambda_p + \Delta\lambda + d\lambda + \omega_z \Delta t_1; \lambda_2 = \lambda_p + \pi + \Delta\lambda - d\lambda + \omega_z \Delta t_2,$$

где  $\Delta\lambda$  — расстояние от географической долготы восходящего узла до географической долготы пункта по азимуту, град;  $d\lambda$  — смещение долготы восходящего узла за счет наклона, град;  $\omega_z \Delta t$  — смещение долготы восходящего узла за счет поворота Земли за время полета от восходящего узла до точки, град.

**Моделирование коррекций.** Во время движения по орбите КА подвергается воздействию: гравитационных полей Земли, Солнца, Луны, аэродинамическому напору, возмущениям от включений двигательной установки КА. Все перечисленные факторы, поддаются точному аналитическому расчету. Воздействие хотя и составляет малую величину (при плотности  $10^{-14} - 10^{-13}$  кг/м<sup>3</sup> на высоте 600 км), но при постоянном действии приводит к существенному снижению высоты орбиты. Торможение КА и темп снижения высоты орбиты в значительной мере определяются уровнем солнечной активности, носящем случайный характер и оцениваемом по средней величине. Текущие же (случайные) значения высоты и темпа ее падения определяются по данным измерений орбиты. При этом темп падения высоты незначителен, что избавляет от необходимости принимать срочные решения по подъему высоты орбиты. Для поддержания свойств ССО достаточно отслеживать и регулировать величину смещения момента прихода  $\Delta t_n$  в восходящий узел фактического движения от опорного. Задача заключается в том, чтобы определить, до какого уровня необходимо поднять высоту реальной орбиты (в соответствии с эквивалентными затратами  $\Delta V$  на коррекцию), чтобы после подъема максимальное значение  $\Delta t$  не вышло за установленный предел  $\Delta t_m$ .

Ускорение с учетом торможения определяется по формуле

$$w = c_6 \rho (R_e + H_0)^2 \omega^2,$$

где  $c_6 = c S_m / 2m$  — баллистический коэффициент КА, м<sup>2</sup>/кг;  $S_m$  — площадь миделева сечения, м<sup>2</sup>;  $m$  — масса КА, кг;  $c = 2,0 - 2,2$  — коэффициент аэродинамического сопротивления;  $\rho$  — средняя плотность атмосферы на высоте  $H_0$ , кг/м<sup>3</sup>. Процесс падения высоты и ее поднятие с помощью коррекций рассматривается за период времени: 0,5 года (180 суток). Число витков за 180 суток полета составляет:  $n = 2700$ . Падение высоты орбиты за сутки составляет 130 м. Допустимое значение падения высоты составляет 2000 м. Продолжительность падения на допустимую величину составляет 15 суток. Импульс необходимый для подъема на высоту  $\Delta u$  составляет 1,1 м/с. Необходимое число коррекций (подъемов) высоты орбиты 12 раз. Суммарный импульс:  $\Delta V_\Sigma = \Delta V k = 1,1 \cdot 12 = 13,2$  м/с. Расход топлива:

$$\Delta m = \left( 1 - e^{-\frac{\Delta V_\Sigma}{c}} \right) m_{КА} = \left( 1 - e^{-\frac{13,2}{2600}} \right) \cdot 750 = 3,8 \text{ кг.}$$

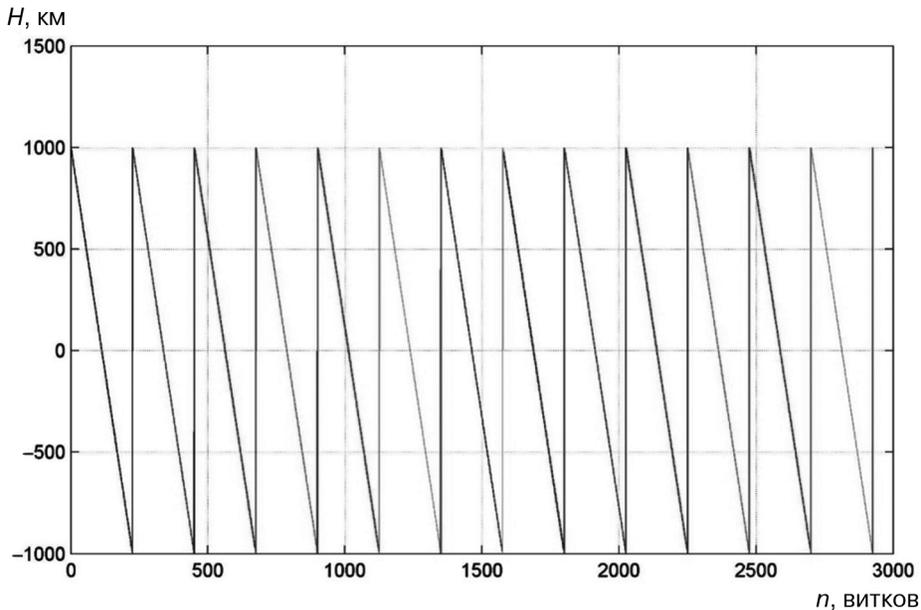
Далее строится зависимость периодической функции  $H(n)$ , где диапазон изменения высоты орбиты лежит в пределах  $[-1 - 1]$  км (рис. 8). Основные параме-

тры для построения: допустимый диапазон падения высоты 2000 м; продолжительность падения на диапазон высоты 15 суток; число коррекций 12.

Расчетная формула:

$$H(i, j) = H_{\max} - \Delta y \left( \frac{n-1}{225} - i + 1 \right), \quad n = \left( i - 1 + \frac{j-1}{\tau} \right) 225,$$

$$1 \leq i \leq k + 1; 1 \leq j \leq \tau + 1; \tau = 225; H_{\max} = 1000 \text{ м.}$$



**Рис. 8.** Изменение высоты орбиты под воздействием атмосферы и коррекция ее поддержания

**Заключение.** Разработана комплексная методика расчета параметров орбиты для КА ДЗЗ с учетом анализа условий освещенности, кратности, покрытия и видимости поверхности Земли, позволяющая сократить временные затраты на этапе формирования технических предложений.

В методике предложена система математических моделей, реализованная в виде алгоритмов в программном пакете MatLab, с помощью которой выполнена оценка параметров рабочей орбиты КА «БелКА» с учетом: постоянства солнечной освещенности; видимости земной поверхности в заданное время полета КА над одними и теми же участками обследуемой местности; глобального обзора Земли; наилучшей оперативности наблюдения районов земной поверхности; требуемых коррекций высоты орбиты, понижающейся вследствие торможения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Montenbruck O. and Gill E.* Satellite orbits: models, methods, applications. Springer — Verlag Berlin Heidelberg, 2000. 369 p.
- [2] *Hastings D. and Garrett H.* Spacecraft-Environment interactions. Cambridge University press, 2004. 320 p.

- [3] *Davis V.A. and Gordon L.W.* Spacecraft surface charging handbook. NASA, technical report, 1992. 343 p.
- [4] *Hughes P.C.* Spacecraft attitude dynamics. Dover publications, Mineola, 2004. 592 p.
- [5] *Schaub H. and Junkins J.L.* Analytical mechanics of space systems, Second edition. AIAA, Reston, 2009. 794 p.
- [6] *Ходненко В.П., Хромов А.В.* Выбор проектных параметров системы коррекции орбиты космического аппарата дистанционного зондирования земли // Вопросы электромеханики. 2011. Т. 121. С. 15—22.
- [7] *Asghar E., Mehran M., Ali A.* Orbit analysis of a remote sensing satellite for local observation of the earth surface // Applied Science and Research Association (ASRA) Department of Mechanical Engineering, Toosi University of technology, 2005. 5 p.
- [8] *Lovera M.* Control-oriented modelling and simulation of spacecraft attitude and orbit dynamics // Journal of Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, Special issue on Modular Physical Modelling, 2006. Vol. 12. No. 1. P. 73—88.
- [9] *Sidorenko V.V. and Neishtadt A.I.* Investigation of the stability of long-periodic planar motion of a satellite in a circular orbit // Cosmic Research. 2000. Vol. 38. No. 3. P. 289—303.
- [10] *Casella F., Lovera M.* High-Accuracy orbital dynamics simulation through keplerian and equinoctial parameters / The Modelica Association, Modelica, March 3rd—4 th. 2008. P. 505—14.
- [11] URL: [https://www.energia.ru/rus/news/news-2006/press\\_release-07-26.html](https://www.energia.ru/rus/news/news-2006/press_release-07-26.html) (дата обращения: 26.07.2006).

© Михайловский К.В., Городецкий М.А., 2017

#### **История статьи:**

Дата поступления в редакцию: август 2017

Дата принятия к печати: сентябрь 2017

#### **Для цитирования:**

**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. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-361-372

#### **Сведения об авторах:**

*Михайловский Константин Валерьевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана. *Контактная информация:* e-mail: konst\_mi@mail.ru

*Городецкий Михаил Алексеевич*, магистрант 2-го года обучения кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана. *Контактная информация:* e-mail: mikgord@gmail.com

## **DEVELOPMENT OF METHOD FOR DETERMINING AND CORRECTING PARAMETERS OF THE WORKING ORBIT OF THE EARTH REMOTE SENSING SATELLITE**

**K.V. Mikhaylovskiy, M.A. Gorodetsky**

Bauman Moscow State Technical University (National Research University)  
2-nd Baumanskaya str., 5/1, Moscow, Russia, 105005

A technique for the complex analysis of the characteristics of orbits used for space vehicles for remote sensing of the Earth (RSE), taking into account their trajectory, is proposed. The results of mathematical modeling of the operating conditions of such devices are presented. The technique is tested taking into account the input parameters of the orbit of the BelKA spacecraft. The technique will be useful in choosing of complex orbital characteristics for RSE spacecraft at the stage of technical proposals.

**Key words:** space vehicles for remote sensing of the Earth, solar-synchronous orbit, modeling, determination of characteristics

### **REFERENCES**

- [1] Montenbruck O. and Gill E. *Satellite orbits: models, methods, applications*. Springer — Verlag Berlin Heidelberg, 2000. 369 p.
- [2] Hastings D. and Garrett H. *Spacecraft-Environment interactions*. Cambridge University press, 2004. 320 p.
- [3] Davis V.A. and Gordon L.W. *Spacecraft surface charging handbook*. NASA, technical report, 1992. 343 p.
- [4] Hughes P.C. *Spacecraft attitude dynamics*. Dover publications, Mineola, 2004. 592 p.
- [5] Schaub H. and Junkins J.L. *Analytical mechanics of space systems*, Second edition. AIAA, Reston, 2009. 794 p.
- [6] Khodnenko V.P., Khromov A.V. Selection of the design parameters of the orbit correction system for the space remote sensing satellite // *Questions of electromechanics*. 2011. Vol. 121. P. 15—22.
- [7] Asghar E., Mehran M., Ali A. Orbit analysis of a remote sensing satellite for local observation of the earth surface // *Applied Science and Research Association (ASRA) Department of Mechanical Engineering, Toosi University of technology*, 2005. 5 p.
- [8] Lovera M. Control-oriented modelling and simulation of spacecraft attitude and orbit dynamics // *Journal of Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, Special issue on Modular Physical Modelling*. 2006. Vol. 12. No. 1. P. 73—88.
- [9] Sidorenko V.V. and Neishtadt A.I. Investigation of the stability of long-periodic planar motion of a satellite in a circular orbit // *Cosmic Research*. 2000. Vol. 38. No. 3. P. 289—303.
- [10] Casella F., Lovera M. High-Accuracy orbital dynamics simulation through keplerian and equinoctial parameters / *The Modelica Association, Modelica*, March 3rd—4th. 2008. P. 505—514.
- [11] Site: [https://www.energia.ru/rus/news/news-2006/press\\_release-07-26.html](https://www.energia.ru/rus/news/news-2006/press_release-07-26.html) (Data: 26.07.2006).

#### **Article history:**

Received: August 2017

Accepted: September 2017

#### **For citation:**

**Mikhaylovskiy K.V., Gorodetsky M.A. (2017) Development of method for determining and correcting parameters of the working orbit of the earth remote sensing satellite. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(3), 361—372. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-361-372**

**Bio Note:**

*Mikhailovskiy Konstantin Valerievich*, candidate of technical sciences, associate professor of the department “Rocket and space composite construction”. Bauman MSTU. *Contact information:* e-mail: konst\_mi@mail.ru

*Gorodetsky Mikhail Alekseevich*, master student of the 2nd year of the department “Rocket and space composite construction”. Bauman MSTU. *Contact information:* e-mail: mikgord@gmail.com



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-373-381

УДК. 621.389

## АНАЛИЗ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ РАЗВЕРТЫВАЮЩИХ АЦП ВРЕМЯ-ИМПУЛЬСНОГО ТИПА С СИСТЕМОЙ ГРУБО-ТОЧНОГО ОТСЧЕТА

А.З. Ходоровский, А.В. Назаров

Московский авиационный институт  
ул. Новая Басманная, 16-а, Москва, Россия, 107078

Приведен анализ динамических свойств развертывающих аналого-цифровых преобразователей (АЦП) время-импульсного типа с системой грубо-точного отсчета (ГТО). Введено понятие коэффициента ускорения процесса преобразования и исследована его зависимость от числа разрядов и количества ступеней преобразования. Даны рекомендации по выбору параметров преобразователей. Предложена методика оптимального распределения разрядов по ступеням преобразования, обеспечивающая наилучшие динамические свойства грубо-точных преобразователей. Показано, что реализация грубо-точных методов обеспечивает многократное ускорение процессов преобразования в развертывающих АЦП время-импульсного типа, причем наибольший прирост скорости наблюдается при переходе от одноступенчатого к двухступенчатому преобразованию.

**Ключевые слова:** АЦП, система грубо-точного отсчета, динамические характеристики

**Введение.** Развитие современного рынка АЦП идет по двум направлениям. С одной стороны, продолжается совершенствование классических архитектур, направленное на удовлетворение растущих запросов потребителей. В настоящее время на рынке присутствуют более двух тысяч различных типов АЦП и все они имеют жесткую архитектуру и фиксированные параметры. Однако в последние годы стала проявляться тенденция к созданию АЦП, ориентированных на использование в системах обработки информации, которые можно разбить на две группы.

Первая группа предназначена для решения узкого класса задач. Эти АЦП работают обычно с одним источником аналоговых сигналов и используются, например, при обработке видеoinформации. Требования к преобразователям в них жестко фиксированы, а разработчики таких систем обычно удовлетворяются присутствующими на рынке микросхемами АЦП с жесткой архитектурой.

Вторая группа включает системы обработки информации, решающие круг задач обработки большого количества разнообразных аналоговых сигналов, требования к качеству обработки которых могут также сильно отличаться. К таким системам можно отнести многие измерительно-информационные и телеметрические системы. Применение в них АЦП с жесткой архитектурой и фиксированными параметрами существенно ограничивает возможности указанных систем.

Механическое же увеличение количества микросхем АЦП в соответствии с разнообразием требований, часто неприемлемо по экономическим и технологическим причинам. В связи с этим, в последние годы делается все больше попыток создания, так называемых, встроенных АЦП, учитывающих специфику систем обработки информации, в которых они устанавливаются. К сожалению, в большинстве своем данные АЦП строятся на базе классических архитектур, а их адаптация к условиям применения ограничивается, как правило, внешними параметрами, например, числом обслуживаемых каналов.

Таким образом, возникла необходимость в проведении работ по созданию устройств, способных путем программирования менять структуру и параметры АЦП «на лету», реализуя различные типы алгоритмов аналого-цифрового преобразования. В этих условиях на первый план выходят задачи исследования и оптимизации динамических характеристик АЦП, причем наиболее эффективным способом ускорения процессов в таких структурах является переход к грубо — точным методам преобразования сигналов.

В общем случае, к группе развертывающих — относят классические АЦП последовательного счета, а также различные типы интегрирующих АЦП [1—3]. Преобразователи этой группы просты в реализации, имеют сравнительно высокие точностные параметры, но, к сожалению, не обеспечивают высокого быстродействия. Одним из путей ускорения процессов в таких структурах служит переход к грубо-точным методам. В преобразователях при этом выделяется ряд ступеней, каждая из которых обеспечивает формирование своей группы разрядов выходного кода. Начинается преобразование со старшей ступени, обеспечивающей квантование сигнала с максимальным шагом, а заканчивается младшей ступенью, оцифровка в которой происходит с наименьшим шагом. К сожалению, ряд обстоятельств препятствует широкому распространению и внедрению данных методов. Так, кроме значительных аппаратных затрат на реализацию, связанных с согласованием шкал между соседними ступенями преобразования, не исследованным остается проблема оптимизации временных характеристик таких преобразователей, тесно связанная с исследованием их динамических свойств [4].

Отличительной особенностью развертывающих АЦП является наличие в каждом цикле преобразования двух операций: а) формирование монотонно изменяющегося уравнивающего сигнала и б) подсчет числа счетных импульсов за время уравнивания кодируемой величины. В АЦП с линейным и ступенчатым уравниванием максимальное время, затрачиваемое на получение цифрового отсчета, составляет  $T_{\text{ПР}} = 2^n \tau$ , где  $n$  — число разрядов преобразователя;  $\tau$  — период счетных импульсов. В АЦП с двухтактным интегрированием эта величина вдвое выше.

Данное обстоятельство существенно сужает сферы применения классических развертывающих АЦП, поэтому разработчиков всегда интересовала возможность ускорения процесса преобразования в таких структурах. Одним из методов, решающих данную задачу, является метод грубо-точного отсчета (ГТО), который позволяет, при определенных условиях, существенно повысить динамические параметры указанных АЦП.

**Предлагаемый метод.** В любом АЦП преобразование сводится к получению двоичного кода  $A = a_{n-1}a_{n-2}\dots a_0$ , ( $a_i \in [0, 1]$ ). Его численный эквивалент:

$$N(A) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i \text{ связан с преобразуемой величиной формулой}$$

$$x = N(A)q + \varepsilon_{\text{кв}}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{\text{кв}}$  — погрешность квантования;  $q$  — шаг квантования (квант). При равномерной шкале квантования шаг определяется отношением диапазона кодируемой величины к числу квантов преобразования:

$$q = \frac{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}{2^n}, \quad (2)$$

где  $x_{\text{max}}$ ,  $x_{\text{min}}$  — верхняя и нижняя границы диапазона соответственно.

Преобразуемая величина делит диапазон преобразования на нижнюю (от  $x_{\text{min}}$  до  $x$ ) и верхнюю (от  $x$  до  $x_{\text{max}}$ ) части.

Выходной код можно получить путем оцифровки как нижней, так и верхней частей (участков). При этом кодирование нижнего участка приводит к прямому коду результата, а верхнего — к обратному. На практике чаще кодируют нижний участок. Однако при переходе к грубо-точным методам востребованными могут оказаться оба варианта. Процесс преобразования в любом АЦП сводится к отысканию квантованного уровня, равно первого слагаемому в правой части формулы (1). Способ отыскания величины  $N(A)q$  — основной признак, определяющий принадлежность преобразователя к тому или иному классу. В данной работе анализ проводится применительно к развертывающим АЦП, квантованию в которых подвергается не сам участок диапазона, а пропорциональный ему временной интервал ( $x_1 - x_2$ ). Для его формирования в момент  $t_1$  из границы участка ( $x_1$ ), в сторону границы ( $x_2$ ) запускается линейно изменяющийся сигнал ( $y$ ) с коэффициентом наклона  $k$ :

$$y = k(t - t_1), \quad (3)$$

продолжающийся до момента  $t_2$  перехода этого сигнала через границу  $x_2$ . Математически величина  $t_2$  есть решение относительно  $t$  уравнения:

$$x_2 = x_1 + k(t - t_1). \quad (4)$$

Технически же момент  $t_2$  определяется с помощью аналогового компаратора, на входы которого подаются сигналы, соответствующие левой и правой частям уравнения (4). В момент равенства, компаратор меняет свое состояние, что и свидетельствует об окончании интервала. Уравнение (4) является не единственным способом представления уравнения. Переноса отдельные члены уравнения из одной части в другую можно получить различные варианты уравновешивания. Каждому из них будет соответствовать свой способ технического решения.

Формально процедуру квантования временных интервалов, т.е. подсчет числа счетных импульсов за время  $(t_2 - t_1)$ , можно представить так:

$$N(A) = Ent \left[ \frac{(t_2 - t_1)}{\tau} \right], \quad (5)$$

где  $Ent[A]$  — операция выделения целой части  $A$ .

Диапазон значений погрешности квантования временных интервалов  $\Delta t$  зависит от взаимного расположения момента времени  $t_1$  и момента поступления первого счетного импульса. Когда начало преобразования синхронизировано со счетными импульсами, а первый импульс отстоит от  $t_1$  на величину периода  $\tau$ , диапазон возможных значений  $\Delta t$  оказывается в пределах  $[0-\tau]$ . При этом шаг квантования сигнала по уровню  $q$  определяется произведением  $q = k\tau$ , а погрешность квантования  $\varepsilon_{кв} = k\Delta t$ . С учетом этого формулу (1) можно переписать в виде:

$$x = N(A)k\tau + k\Delta t. \quad (6)$$

Так обстоит дело в классических АЦП. В преобразователях же с системой ГТО весь процесс преобразования разбивают на  $K$  этапов, причем на первых  $(K - 1)$  этапах выбирается шаг  $q = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2^{n_k}}$  и формируются  $n_k$  старших разрядов выходного кода. На последнем ( $K$ -м) этапе, с шагом  $q_k = q$  формируются  $n_k$  младших разрядов выходного кода. Совокупность элементов, участвующих в преобразовании на  $i$ -м этапе принято называть  $i$ -й ступенью преобразования. При этом отдельные элементы могут входить в несколько ступеней. Выходной код преобразователя образуется как совокупность всех разрядных групп. Соответственно общее число разрядов преобразователя определяется суммой разрядов всех групп:

$$n = \sum_{i=1}^K n_i. \quad (7)$$

В общем случае, число ступеней преобразователя ( $K$ ) может изменяться от 1 до  $n$ . При  $K = 1$  АЦП с системой ГТО вырождается в классический АЦП последовательного счета. Оценкой времени преобразования в АЦП с системой ГТО может служить величина, определяемая соотношением:

$$T_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^K 2^{ni} \tau. \quad (8)$$

Этот параметр зависит от числа разрядов и ступеней преобразователя, и от распределения разрядов по ступеням. При фиксированных  $n$  и  $K$  время преобразования определяется только разрядностью ступеней. При этом минимальное время преобразования  $T_{\text{пр min}}$  достигается, если при выборе числа разрядов ступеней руководствоваться следующей методикой.

1. Разделить общее число разрядов АЦП на количество ступеней:  $n/K$ .
2. Представить результат в виде суммы целой части ( $C$ ) и правильной дроби:  $n/K = C + r/K$ , где  $r$  — это остаток от деления нацело числа разрядов АЦП на число ступеней преобразования.
3. Все множество ступеней преобразования  $K$  разделить на две группы  $K_1$  и  $K_2$  так, чтобы:  $K_1 = (K - r)$  и  $K_2 = r$ .
4. Число разрядов каждой ступени группы  $K_1$  установить равным целой части частного  $C$ , а число разрядов группы  $K_2$  принять как  $(C + 1)$ , тогда время преобразования окажется минимальным и равным:

$$T_{\text{пр min}} = 2^C(K + r)\tau. \quad (9)$$

Порядок чередования ступеней при этом значения не имеет. Далее, определив коэффициент  $C$  через параметры преобразования:  $C = (n - r)/k$ , и подставив это выражение в формулу (9), получаем:

$$T_{\text{пр min}} = (K + r) \cdot 2^{\left(\frac{n-r}{K}\right)}. \quad (10)$$

Чтобы определить во сколько раз по сравнению с одноступенчатым преобразователем сокращается время на получение цифрового отсчета в АЦП с системой ГТО, введем коэффициент ускорения преобразования  $G_n^K$ , который формально можно представить в виде:

$$G_n^K = \frac{2^n \cdot \tau}{T_{\text{пр min}}}. \quad (11)$$

После подстановки выражения (10) в формулу (11) получаем:

$$G_n^K = \frac{2^{\frac{n(K-1)+r}{K}}}{K + r}. \quad (12)$$

Или в более удобном для расчета виде:

$$G_n^K = \frac{2^{n - \frac{(n-r)}{K}}}{K + r}. \quad (13)$$

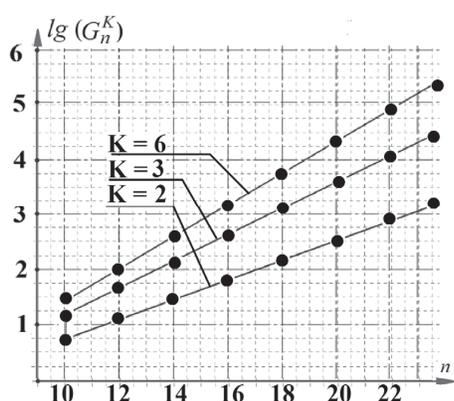
Легко видеть, что член  $(n - r)/K$  в этом выражении представляет собой целую часть частного ( $C$ ) от деления числа разрядов преобразователя на количество ступеней. Результаты расчетов коэффициентов  $G_n^K$  при различных значениях параметров  $n$  и  $K$  сведены в таблице 1.

На рисунках 1 и 2 представлены семейства функций, построенные на основании этих данных.

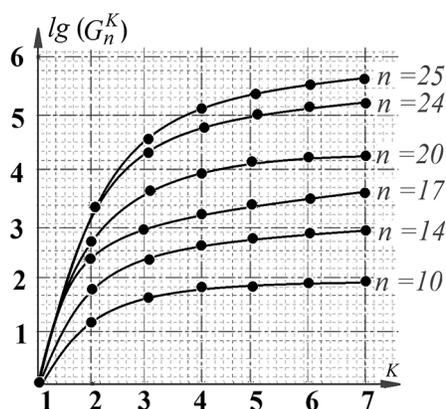
Таблица 1

**Зависимость коэффициентов ускорения  $G_n^K$  от числа разрядов ( $n$ ) и числа ступеней ( $K$ ) грубо – точных АЦП:  $G_n^K = f(n, K)$**   
[Dependence of the acceleration coefficients ( $G_n^K$ ) on the number of bits ( $n$ ) and the number of stages ( $K$ ) of coarse-precision ADCs:  $G_n^K = f(n, K)$ ]

K	n												
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	24	25
2	16	21	32	43	64	85	128	171	256	341	512	2048	2731
3	32	51	85	128	205	341	512	819	1365	2048	3277	21845	32768
4	43	73	128	205	341	585	1024	1638	2731	4681	8192	65536	104858
5	51	85	146	256	455	819	1365	2341	4096	7282	13107	116508	209715
6	51	93	171	293	512	910	1638	2979	5461	9362	16384	174763	299593
7	51	93	171	315	585	1024	1820	3277	5958	10923	20165	209715	381300



**Рис. 1.** Зависимость  $\lg(G_n^K) = f(K)$   
[Fig. 1. Dependence  $\lg(G_n^K) = f(K)$ ]



**Рис. 2.** Зависимость  $\lg(G_n^K) = f(n)$   
[Fig. 2. Dependence  $\lg(G_n^K) = f(n)$ ]

Логарифмические зависимости значений коэффициентов ускорения от числа разрядов преобразования ( $n$ ) в диапазоне  $n = 10–25$  подчиняются линейному закону, который можно описать функцией

$$\lg(G_n^K) = L_K(n - 10). \quad (14)$$

Соответствующие значения коэффициентов наклона прямых в зависимости от числа ступеней приведены в таблице 2.

Таблица 2

**Зависимость коэффициентов наклона прямых (14) от количества ступеней**  
[Dependence of the slopes coefficients of the straight lines (14) on the number of steps]

K	2	3	4	5	6	7
$L_K$	0,148	0,201	0,226	0,241	0,251	0,258

**Выводы.**

1. Предложена методика оптимального распределения разрядов по ступеням, обеспечивающая наилучшие динамические свойства грубо-точных преобразователей.

2. Реализация грубо-точных методов обеспечивает существенное ускорение процессов преобразования в развертывающих АЦП время-импульсного типа, причем наибольший прирост скорости наблюдается при переходе от одноступенчатого к двухступенчатому преобразованию. Коэффициенты ускорения при этом оказываются существенно зависящими от разрядности преобразователей.

3. Введено понятие коэффициентов ускорения, позволяющих оценить выигрыш в быстродействии, получаемый за счет перехода в развертывающих АЦП к системе ГТО.

4. Данные, приведенные на рисунках 1 и 2, показывают, что для 10-ти разрядных АЦП переход к 2-х ступенчатому грубо-точному методу сокращает время преобразования в 16, а для 25-ти разрядных — в 2731 раз. При переходе к 3-х ступенчатому преобразованию быстродействие возрастает еще в 2 раза для 10-и разрядных АЦП и в 12 раз — для 25-ти разрядных АЦП. Добавление же в эти преобразователи четвертой ступени дает прирост быстродействия еще в 1,3 раза и 3,2 раза соответственно. Таким образом, в работе показано, что:

— наиболее предпочтительным является использование в АЦП с системой ГТО от 2-х до 4-х ступеней преобразования;

— поскольку при числе ступеней равно  $n/2$  для четных и  $(n + 1)/2$  для нечетных  $n$  время преобразования достигает минимума, то дальнейшее увеличение количества ступеней не приводит к повышению быстродействия АЦП и, следовательно, с этой точки зрения не имеет практического смысла.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Гитис Э.И., Пискулов Е.А.* Аналого-цифровые преобразователи: учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1981. 360 с.
- [2] *Никамин В.А.* Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи: справочник. СПб.: Корона принт «Альтекс-А», 2003. 224 с.
- [3] *Бабич Н.П., Жуков И.А.* Компьютерная схемотехника. Методы построения и проектирования: учеб. пособие. Киев: «МК-Пресс», 2004. 576 с.
- [4] *Ходоровский А.З., Назаров А.В., Азаров А.В., Магомедгаджиев А.М.* Минимизация объема данных на выходе аналого-цифрового преобразователя при заданной погрешности преобразования. М.: МАИ, электронный журнал «Труды МАИ». № 84. 2014.

© Ходоровский А.З., Назаров А.В., 2017

### История статьи:

Дата поступления в редакцию: август 2017

Дата принятия к печати: сентябрь 2017

### Для цитирования:

**Ходоровский А.З., Назаров А.В.** Анализ быстродействия развертывающих ацп время-импульсного типа с системой грубо-точного отсчета // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: «Инженерные исследования»*. 2017. Т. 18. № 3. С. 373—381. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-373-381

### Сведения об авторах:

*Ходоровский Александр Зиновьевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий конструирования радиоэлектронных устройств Московского

авиационного института (МАИ). *Сфера научных интересов:* цифровая электроника, аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование сигналов, теория автоматов, конвейерная обработка данных. *Контактная информация:* e-mail: ahazz@mail.ru

*Назаров Александр Викторович*, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных технологий конструирования радиоэлектронных устройств Московского авиационного института (МАИ). *Сфера научных интересов:* автоматизация конструирования и системы автоматизации проектирования радиоэлектронных средств. *Контактная информация:* e-mail: rat-rut@yandex.ru

## **ANALYSIS OF PERFORMANCE A SCANNING ANALOG-DIGITAL CONVERTER OF THE “TIME-IMPULSE” TYPE WITH A COARSELY-ACCURATE SYSTEM OF A COUNTING**

**A.Z. Hodorovsky, A.V. Nazarov**

Moscow Aviation Institute  
*Novaya Basmannaya str., 16-a, Moscow, Russia, 107078*

Dynamic properties of ADC time-impulse type with a coarse-fine reference system are analyzed. The concept of the acceleration coefficient of the transformation process is introduced, and its dependence on the number of discharges and the number of conversion steps is investigated. Recommendations for the choice of the parameters of the transducers are given. A technique is proposed for the optimal distribution of discharges over the conversion stages, which ensures the best dynamic properties of coarse-accurate converters. It is shown that the implementation of coarse-precision methods provides multiple acceleration of the conversion. The fastest rate increase observed in the transition from a single-stage to a two-step transformation.

**Key words:** ADC, system of coarse-precise reference, dynamic characteristics

### **REFERENCES**

- [1] Gitis E.I., Piskulovof E.A. Analog-digital converters: A manual for universities. M.: Energoatomizdat, 1981. 360 p.
- [2] Nikamin V.A. Analog-digital and digital-to-analog converters. Directory. SPb.: Crown print of “Alteks-A”, 2003. 224 p.
- [3] Babich N.P., Zhukov I.A. Computer circuitry. Methods of construction and design: Textbook. Kiev: “MK-Press”, 2004. 576 p.
- [4] Hodorovsky A.Z., Nazarov A.V., Azarov A.V., Magomedgadzhiev A.M. Minimization of volume of data at the exit of an analog-to-digital converter at the given error of transformation. M.: MAI, Trudy MAI Online magazine. No. 84. 2014.

### **Article history:**

Received: August 2017

Accepted: September 2017

### **For citation:**

**Hodorovsky A.Z., Nazarov A.V. (2017) Analysis of performance a scanning analog-digital converter of the “time-impulse” type with a coarsely-accurate system of a counting. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(3), 373–381. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-373-381**

**Bio Note:**

*Khodorovsky Alexander Zinovievich*, Cand.Tech.Sci., Associate Professor of Information Technologies in the Design of Radioelectronic Devices, Moscow Aviation Institute (MAI).

*Research interests:* digital electronics, analog-to-digital and digital-to-analog conversion of signals, theory of automata, pipelining of data. *Contact information:* e-mail: ahazz@mail.ru

*Aleksandr V. Nazarov*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Technology of Radio Electronic Device Design, Moscow Aviation Institute (MAI).

*Research interests:* design automation and automation control systems for design of radio electronic devices. *Contact information:* e-mail: rat-rut@yandex.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-382-390

УДК 711.4-112

## APPENDIX TO THE CLASSIFICATION OF RURAL SETTLEMENTS IN THE REPUBLIC OF SERBIA ACCORDING TO THEIR URBAN-MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS

D. Dopudja

Peoples' Friendship University of Russia  
*Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198*

The given article has a goal to present a method of built structure spatial analysis from urban-morphological aspect, through an analytical overview of Serbian village settlements, and to propose its' update, in accordance with changes that took place in last few decades.

**Key words:** village, settlement, rural, urban morphology, genesis, spatial development, reclassification

Analysis of a settlement according to its urban — morphological characteristics represents one of several classifications, simultaneously used in Serbian professional practice in order to determine characteristics of a rural settlement. This approach stems from the turbulent history of Balkan Peninsula, due to which, the once single corpus of Serbian architecture, was maturing within three different spheres of influence: Slavic, Central European, and Oriental. Such a dichotomy, catalyzed with an absolute spatial ephemerality of the aforementioned influence spheres — in which literally every single settlement was developing within at least two, determined an introduction of time — space continuum inside urbanistic and spatial development practice [1; 2].

As a concept, morphological studies are no stranger to Russian science; however, in most cases, they are related to linguistics, philosophy, geography, and similar sciences. In the architectural profession, the use of (urban) morphology as a scientific discipline has yet to take hold [3]. Therefore, in order to more closely explain approach and methods that were used in making of accompanying classification, we will first explain the very notion of morphological studies in urbanism, and only after that, we will represent an existing classification of rural settlements in Republic of Serbia and suggest some amendments in order to improve it.

The term “morphology” was created as a coin from Greek words “morphe” (form) and “logos” (science), and, therefore, can be defined as the science about the origin and development of the form [4]. The morphology, as a form of research, represents an integral part of many scientific disciplines, and is used as a method of explaining the phenomena and processes related to the creation of specific shapes. The essential characteristics of all morphological investigations are principle of joint exploration of form and structure, and determination of common morphological characteristics (comparative analysis).

According to architect Vladan Djokic, PhD, urban morphology is “a discipline that deals with the study of built structures and open spaces form origin and later development

inside urban areas”<sup>1</sup>. In this context, a definition of urban morphology by geographer and urban planner Milan Vresk is also significant: “The urban morphology is a branch of urban geography that studies the morphological structure of the city within its three-dimensional characteristics”<sup>2</sup>. Analyzing Vresk’s capital work, “Fundamentals of urban geography”, Djokic concludes that “By the morphological structure of the city, author thinks of spatial arrangement and relationships of morphological elements in the metropolitan (urban) area, such as street, squares, plots, public places, blocks, buildings, etc. Their specific features, such as building density, their size, shape, position, appearance, etc, distinguish these elements. Morphological structure of the city largely depends of his spatial plan, development land usage, meaning and deployment of functional parts of the city, the city’s development in the past and present”<sup>3</sup>.

In accordance with the methodology of the urban morphology, in the territory of the Republic of Serbia, it is possible to allocate two basic forms of rural settlements: a dispersed structure village settlement and one with compact structure [5; 6]. Criteria, according to which those settlements are being classified, are:

- The gross density of the settlement’s built structure;
- The possibility or impossibility to determine settlement boundaries;
- The size and structure of estates, as well as distance between them.

Both village types, (compact and dispersed structure villages), are divided into subtypes, in accordance with a more detailed analysis of their characteristics. The division shown below is an existing division of rural settlements in the Republic of Serbia, with newly generated forms attached (*in italic*). Urban — morphological properties of the newly fixated forms will be presented after characteristics of the “old” settlement types, together with argumentation of their classification into one or another group.

— **Compact structure village settlement:**

*Settlement with semi compact structure:*

- Systematically developed (planned) settlement;
- Subsequently planned settlement;
- Spontaneously formed settlement;
- Dispersed settlement.

*Settlement with completely compact structure:*

- Spontaneously formed settlement;
- Roadside village;
- Shantytown.

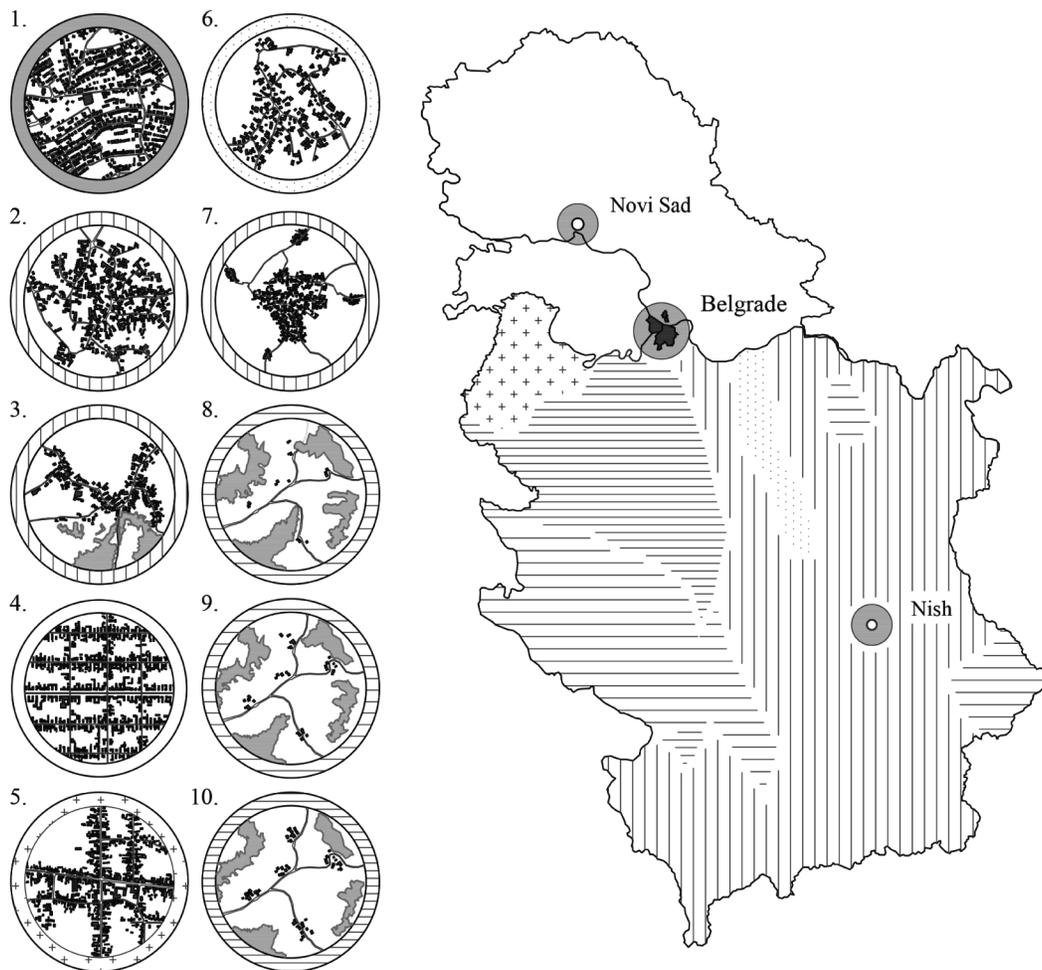
— **Dispersed structure village settlement:**

- Stari Vlah settlement;
- Ibar settlement;
- Shumadija settlement [Fig. 1].

<sup>1</sup> Ђокић, В. Морфолошка истраживања у урбанизму // Часопис Архитектура и урбанизам. 2007. № 20/21. Р. 61.

<sup>2</sup> Вреск, М. Основе урбане географије. З., 1986. Р. 123.

<sup>3</sup> Ђокић, В. Морфолошка истраживања у урбанизму // Часопис Архитектура и урбанизам. 2007. № 20/21. Р. 61—62.



**Villages with completely compact structure:**

1. Slum (shantytown)
2. Spontaneously formed settlement
3. Roadside village

**Semi-compact structure village settlements:**

4. Systematically developed (planned)
5. Subsequently planned settlement
6. Spontaneously formed settlement
7. Dispersed settlement

**Dispersed structure village settlements:**

8. Stari Vlah settlement
9. Ibar village settlement
10. Shumadia settlement

**Fig. 1.** Typology of Serbian village settlements by urban-morphological classification and their spatial distribution

(Рис. 1. Территориальное распределение морфологических типов сельских поселений в Республике Сербии)

Dispersed structure village settlements are subdivided into three groups, each representing one development level of the same archetype, named after the geographical region in which it developed. These are: Stari Vlah, Ibar, and Shumadija subgroups. All dispersed villages are located south of the Sava and Danube rivers, and were formed spontaneously [6].

**Stari Vlah subgroup** of dispersed villages is spread over the mountains of Western and South-Western Serbia, with few additional enclaves in the other parts of the country.

Main characteristic of these villages is the fact that they contain of individual households and small house groups scattered through almost entire village territory: village, as a spatial grouping, does not exist. Gross population density ranges from 1 to 5 p/ha<sup>1</sup>. Distances between houses are between 50 and 200 m by air.

**Ibar subgroup** is present in the same areas as Stari Vlah subgroup, from which they derived — simple by spatial densifying due to population increase; through several generations, one single estate evolved to a hamlet<sup>2</sup>, size up to 30 homes. Distance between hamlets span from 100 to 1000m by air, while population density is between 10 and 15 p/ha.

**Shumadija subgroup** is located exclusively in Central Serbia — Shumadija, after which it was named. Such settlements represent a last transition stage from villages with scattered structure to those with compact one. Their main characteristic is that settlement consists of several more or less distant group of homes, between which agricultural land is located. Shumadija subgroup village settlement is usually located at the atar<sup>3</sup> center, so the distance between homes and agricultural land is considered favorable. The average population density is 15—25 p/ha.

On the other hand, **villages with semi-compact structure** are characterized by average population density ranging from 20 to 25 p/ha, and their construction area is easy to determine. By the manner of forming their urban matrix, they can be divided into two groups: those, in which aforementioned matrix is formed by external intervention (systematically developed (planned) settlements, and subsequently planned ones), and those in which this process took place spontaneously (spontaneously formed and dispersed village settlements).

**Systematically developed** settlements are located exclusively in the autonomous province of Vojvodina (part of the country north of the Sava and Danube rivers). They rose due to Austro — Hungarian planification of Vojvodina in 18<sup>th</sup> century, when existing, spontaneously formed settlements were demolished, and their residents relocated to new ones, based on Baroque ideas of an ideal city.

These villages are characterized by a completely regular, rectangular structure, consistently implemented from the parcel level (average size 40×190 m) to the level of the village itself — which often has a rectangular form too. As a part of the urban tissue, only centrally placed squares stand up; their form completely fits into the general scheme, and in most cases is formed by separating estates from neighboring blocks.

**Subsequently planned villages** are characteristic only for the Machva and Posavina regions. Speaking of such villages, we speak of cross-like shape villages, in which two main streets intersect each other at 90° angle, forming a village center — a group concentration of central functions, which is, as a rule, characterized by the absence of the free space (village square). Households are touching each other with their edges perpendicular to the street. The average population density goes from 20 to 27 p/ha. The

<sup>1</sup> P/ha — People per hectare.

<sup>2</sup> Hamlet is a small human settlement. Usually, it is a subdivision of a village, his satellite entity. Is equivalent to Russian «хутор».

<sup>3</sup> Atar (Serb. — «atar») — all village territories, consisting settlement(s), agricultural land, rivers, lakes, forests, etc.

emergence of those settlements is linked to the efforts of the 19<sup>th</sup> century Serbian authorities to model their villages after those from the neighboring Austro-Hungarian Empire.

In principle, **spontaneously formed semi-compact and completely compact village settlements** have the same morphological characteristics. The noticeable difference exists only in the household sizes, which consequently affects their population densities: gross population density goes from 20—25 p/ha in semi-compact to 30—40 p/ha for completely compact rural settlements [6—10].

The spatial distribution of those two types is identical. Kojic provides more information on their morphological structure: “The main structural characteristics of the older settlements in Kosovo and Metohija, and newer ones in Serbia proper (the latter rose as a result of migrations from the Old Serbia<sup>1</sup> realm) are similar: a completely irregular street network, irregular house blocks and households. Road network was created on the default set of trails and primitive dirt roads, along which new households were formed. As a part of neighborhoods (inside which households are always touching each other), housing groups around dead end streets are also formed; it represents a regular occurrence in those kind of settlements”<sup>2</sup>.

Evolution of such settlements is relatively simple: if possible, they are further compacted by addition of new households, or — if this is impossible — they grow peripherally, maintaining an irregular structure.

In recent decades, three new subtypes of rural settlements came into appearance: **dispersed village settlements, roadside village settlements, and shantytowns**. The first two sub-groups have so far been placed in a group of “special settlements”, while shantytowns have not yet been covered by any practical research.

**Dispersed subtype of village settlements** [Fig. 2] originates from spontaneously formed compact settlements, and is formed primarily due to agrarian overpopulation of the aforementioned. Therefore, in their spatial structure, we can clearly identify a basic, compact group of houses (hamlets), scattered through the village territory. As a rule, during the site selection for new housing units, settlers strive to make minimal impact to the arable land, so they densely group new households side by side. The average population density is in the range of 20—25 p/ha, and the construction zone can be easily defined. For this reasons, we propose adopting dispersed village settlements as a sub-type of semi-compact villages.

Genesis of **roadside villages** [Fig. 3] is linked exclusively to two concepts: de-agrarisation of the rural population<sup>3</sup> and increased level of public safety. That is why households, previously set aside in relation to the main roads, now descent in their immediate vicinity. These settlements are characterized by a pronouncedly longitudinal spatial structure, formed solely around the dominant communication, and with an extremely dense construction, (average lot size is below 2000 m<sup>2</sup>). Due to aforementioned facts, the front

<sup>1</sup> Territory of the medieval Serbian kingdom: Kosovo & Metohija, Rashka (RS), Skopsko-Tetovska region (FYRM) [1].

<sup>2</sup> Којић, Б. Сеоска архитектура и руризам: Теорија и елементи, Б., 1973. Р. 159 [5].

<sup>3</sup> According to official data, in 2015, only 12% of the RS population was working in agriculture [2].

side of all households stretches all up to the road, lateral sides are touching each other, while the rear is usually output to agricultural land. The average population density is around 30—40 p/ha.



**Fig. 2.** Example of dispersed structure village settlement  
(Рис. 1. Пример поселения с разбитой морфологической структурой)



**Fig. 3.** Example of roadside village settlement  
(Рис. 3. Пример придорожного сельского поселения)

In recent decades, due to catalyzation of unplanned city expansion, slums appeared as a special type of urban-rural settlement [Fig. 4]. First origins of such settlements are linked with the Yugoslav post-war reconstruction of the 1950's and rural — urban migrations from that period. Nevertheless, their ultimate expansion took place during

the 1990s, when the socio-political changes in the Balkan Peninsula caused huge migrations [2].



**Fig. 4.** Example of shantytown: Kaludjerica, Belgrade suburb, Serbia  
(Рис. 4. Пример самовольно построенного поселения:  
Калуджерица, пригород Белграда, Сербия)

Beside poor quality of subsequently built and often never finished dwellings, they are characterized by a minimal size lot (about 800—1000 m<sup>2</sup>), exclusively non-agricultural orientation of the population, and the lack of adequate municipal infrastructure. Both are determined by economic reasons. The difference compared to the basic type of spontaneous formed compact settlements is focus on expanding by adding floors (one for each son), to the existing residential building. Therefore, the population density of such settlements ranges up to 70 p/ha.

Taking into account the above arguments, the adoption of the roadside village settlements and shantytowns as subtypes of village settlements with completely compact structure represents a logical conclusion — as they represent by-the-book examples of the groups they are placed into.

## REFERENCES

- [1] Terzich S. *Stara Srbija (XIX—XX vek): Drama jedne civilizacije*. Novi Sad — Belgrade: Pravoslavna rech, Istorijski institut Beograd, 2012. (in Serb).
- [2] Mitrovich M.M. *Sela u Srbiji: Promene strukture i problemi odrzhivog razvoaya*. Belgrade: Republichki zavod za statistiku, 2015. (in Serb).
- [3] Novikov V.A. *Arhitekturnaja organizacija sel'skoj sredy*. Moscow: Arkhitektura-S, 2005. (In Russ)
- [4] Djokich V. *Morfoloshka istrzhivanya u urbanizmu. Chasopis Arkhitektura i urbanizam*. 2007. № 20/21. S. 61—72. (in Serb).
- [5] Vresk M. *Osnove urbane geografije*. Zagreb: Shkolska kniga, 1986. (in Serb-Cro).
- [6] Kojich B.Dj. *Seoska arkhitektura i rurizam: Teoriya i elementi — drugo izdaniye, preradjeno. i dopunjeno*. Belgrade: Izdavachko preduzeche Gradjevinska kniga, 1973. (in Serb).

- [7] Simonovich Dj.R., Ribar M.B. Uredjenje seoskih teritorija i naselya: Urbanizacija sela — drugo izdaniye, preradjeno i dopunjeno. Belgrade: Arhitektonski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1993. (in Serb).
- [8] Ribar M. Savremeni rurizam. Belgrade: Tcentar za multidisciplinarne studije Univerziteta u Beogradu, 1988. (in Serb).
- [9] Videnovich A.Ch. Revitalizaciya tcentara u selima brdsko-planinskih podruhcja Istochne Srbije [dissertation]. Belgrade, 2016. Available from: [http://www.arh.bg.ac.rs/wp-content/uploads/Doktorati/2016/2016\\_27\\_Aleksandar\\_Videnovic\\_disertacija.pdf?pismo=lat](http://www.arh.bg.ac.rs/wp-content/uploads/Doktorati/2016/2016_27_Aleksandar_Videnovic_disertacija.pdf?pismo=lat) (in Serb).
- [10] Findrik R. Dinarska brvnara. Sirogojno: Muzej “Staro selo”, 1998. (in Serb).

© Dopudja D., 2017

**Article history:**

Received: May 2017

Accepted: September 2017

**For citation:**

**Dopudja D. (2017) Appendix to the classification of rural settlements in the Republic of Serbia, according to their urban-morphological characteristics. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(2), 382—390. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-382-390**

**Bio Note:**

*Dopudja D.*, Postgraduate of Department of Architecture and Construction, Academy of Engineering of Peoples’ Friendship University of Russia. *Contact information:* e-mail: [dusan.dopudja@yandex.ru](mailto:dusan.dopudja@yandex.ru)

## ПРИЛОЖЕНИЕ К КЛАССИФИКАЦИИ СЕЛЬСКИХ ПОСЕЛЕНИЙ В РЕСПУБЛИКЕ СЕРБИИ ПО МОРФОЛОГИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Д. Допуджа

Российский университет дружбы народов  
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

В статье представлен метод пространственного анализа застройки с морфологического аспекта на примере аналитического обзора сербских сельских поселений. Обзор содержит обновления, отражающие произошедшие в последние несколько десятилетий изменения в сельской среде Сербии.

**Ключевые слова:** деревня, поселение, сельский, градостроительная морфология, генезис, пространственное развитие, пересмотр классификации

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Терзић С.* Стара Србија (XIX—XX век): Драма једне цивилизације. НС-Б.: Православна реч, Историјски институт Београд, 2012.
- [2] *Митровић М.М.* Села у Србији: Промене структуре и проблеми одрживог развоја. Б.: Републички завод за статистику, 2015.

- [3] *Новиков В.А.* Архитектурная организация сельской среды. М.: Архитектура-С, 2006.
- [4] *Бокјић В.* Морфолошка истраживања у урбанизму // Часопис Архитектура и урбанизам. 2007. № 20/21. С. 61—72.
- [5] *Вреск М.* Основе урбане географије. З.: Школска књига, 1986.
- [6] *Којић Б.* Сеоска архитектура и туризам: Теорија и елементи — друго издање, прерађено и допуњено. Б.: Издавачко предузеће Грађевинска књига, 1973.
- [7] *Симоновић Б.Р., Рибар М.Б.* Уређење сеоских територија и насеља: Урбанизација села — друго издање, прерађено и допуњено. Б.: Архитектонски факултет Универзитета у Београду, 1993.
- [8] *Рибар М.* Савремени туризам. Б.: Центар за мултидисциплинарне студије Универзитета у Београду, 1988.
- [9] *Виденовић А.Ч.* Ревитализација центара у селима брдско-планинских подручја Источне Србије: дисс. ... канд. арх., Београд, 2016. URL: [http://www.arh.bg.ac.rs/wp-content/uploads/Doktorati/2016/2016\\_27\\_Aleksandar\\_Videnovic\\_disertacija.pdf?pismo=lat](http://www.arh.bg.ac.rs/wp-content/uploads/Doktorati/2016/2016_27_Aleksandar_Videnovic_disertacija.pdf?pismo=lat) (дата обращения: 12.08.2017).
- [10] *Финдрик Р.* Динарска брвнара. С.: Музеј «Старо село», 1998.

**История статьи:**

Дата поступления в редакцию: май 2017

Дата принятия к печати: сентябрь 2017

**Для цитирования:**

Допуджа Д. Приложения к классификации сельских поселений в Республике Сербии по морфологическим характеристикам // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: «Инженерные исследования». 2017. Т. 18. № 3. С. 382—390. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-382-390

**Сведения об авторе:**

Допуджа Душан, аспирант департамента архитектуры и строительства инженерной академии Российского университета дружбы народов. Контактная информация: e-mail: dusan.dopudja@yandex.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-391-397

УДК 622.691.24:624.953 (470.26)

## ФЛОТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ВЫРАБОТК-ЕМКОСТЕЙ МЕТОДОМ ПОДЗЕМНОГО РАСТВОРЕНИЯ КАМЕННОЙ СОЛИ С БОЛЬШИМ СОДЕРЖАНИЕМ ГАЗА

В.П. Малюков, Ю.И. Старовойтова

Российский университет дружбы народов  
Подольское ш., 8/5, Москва, Россия, 115419

Проанализированы экспериментальные и натурные исследования флотационных процессов при строительстве выработок-емкостей для резервирования углеводородов методом подземного растворения каменной соли с большим содержанием газа. В зависимости от размеров частиц нерастворимых включений, перешедших в раствор в процессе растворения каменной соли, раствор может быть в виде суспензии или коллоидной системы (при растворении каменной соли с глинистыми включениями сферической формы на месторождении Ходжа-Мумыне). У кровли выработки-емкости, которая сооружается в каменной соли со значительным содержанием газа и с применением в качестве нерастворителя дизельного топлива, образуется пенный слой. Пенный слой у кровли выработки на Лейковском месторождении представлен скоплением пузырьков газа, равномерно распределенным между тонкими прослойками из твердых частиц малого размера с дизельным топливом и раствором.

**Ключевые слова:** каменная соль, подземная выработка-емкость, скважина, растворитель, дисперсные системы, нерастворитель, дизельное топливо, газ, нерастворимые включения, флотационные процессы, пенный слой

Строительство подземной выработки-емкости методом подземного растворения каменной соли с большим содержанием газа в значительной степени определяется физико-химическими, гидродинамическими процессами и массоотдачей в приконтурной зоне выработки различной формы. При подаче растворителя через буровую скважину при гидродинамическом воздействии на границе «каменная соль — флюид» протекают процессы массоотдачи, характеризующие скорость строительства подземной выработки-емкости и ее формообразование.

Коэффициент массоотдачи при растворении каменной соли определяет общую величину подвижки межфазной границы вглубь массива при растворении каменной соли в единицу времени при проявлении различных механизмов переноса массы при разных условиях контактирования фаз (молекулярная диффузия, конвективный перенос, перенос при воздействии на поверхность каменной соли самоорганизующихся гидродинамических вихревых структур, перенос при переходе газа и частиц нерастворимых включений в раствор).

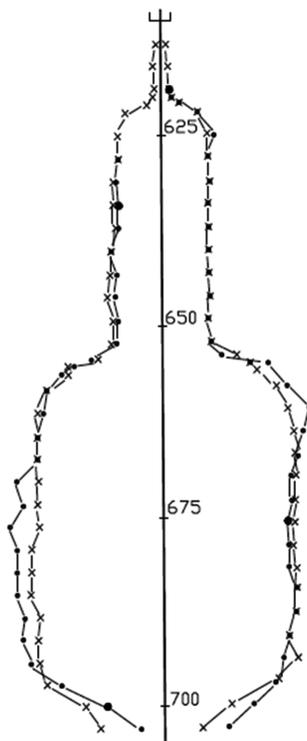
При определении коэффициента массоотдачи на образцах ядра каменной соли из интервала заложения выработок-емкостей обнаружено повышенное содержание газа в породе на Лейковском штоке (Украина) и месторождении Тюз-

Гелю (Турция) [1]. Из породы Лейковского штока при растворении происходит выделение пузырьков газа разных размеров из межкристаллического пространства, а при растворении образцов соли месторождения Тюз-Гелю происходит выделение пузырьков газа примерно одного размера из кристаллов соли.

Методом подземного растворения каменной соли на Лейковском месторождении со значительным содержанием газа построены 10 выработок-емкостей (полезный объем выработок-емкостей по проектному регламенту 50 или 75 тыс. м<sup>3</sup>).

На Лейковском соляном штоке со значительным содержанием газа в межкристаллическом пространстве каменной соли и примесях отмечено увеличение коэффициента массоотдачи каменной соли при растворении примерно на 30% и более быстрое строительство выработок-емкостей по сравнению с расчетными параметрами (примерно на 10%).

На рисунке 1 представлены вертикальные сечения (форма) выработки-емкости 4Т (по материалам звуколокации), сооруженной на Лейковском месторождении.



**Рис. 1.** Вертикальные сечения подземной выработки 4Т по материалам звуколокации.  
Сечения: ●—●— юг-север; ×—×— запад-восток

На различных стадиях строительства выработок-емкостей методом подземного растворения каменной соли с подачей воды-растворителя через буровые скважины происходит растворение каменной соли и разрушение нерастворимых включений (ангидрита, доломита, глины и др.), которые могут быть в рассеянном состоянии или в виде пропластков. В соли могут находиться газы в различных количествах, которые при растворении соли переходят в соляной раствор.

Различают два вида жидких дисперсных смесей: суспензии (взвеси) — дисперсные системы из взвешенных в растворе мелких твердых частиц; эмульсии — дисперсные системы, состоящие из мелких капель жидкости (дисперсной фазы), распределенных в другой жидкости (дисперсионной среде) [2]. Суспензии подразделяются в зависимости от размеров твердых частиц. Коллоидные (тонко-высокодисперсные) системы — дисперсные системы, в которых размеры частиц дисперсной фазы не превышают 1 мкм. Золи (коллоидные системы), в которых частицы дисперсной фазы (мицеллы) размером от 1 нм до 1 мкм. В зависимости от размеров частиц нерастворимых включений, перешедших в раствор в процессе растворения каменной соли, раствор может быть в виде суспензии или коллоидной системы (при растворении каменной соли с глинистыми включениями сферической формы на Ходжа-Мумыне) [3]. В эмульсиях размеры дисперсной фазы (капель) могут находиться в широких пределах. Многие эмульсии под действием силы тяжести расслаиваются, однако если размеры капель менее 0,5 мкм эмульсии становятся устойчивыми.

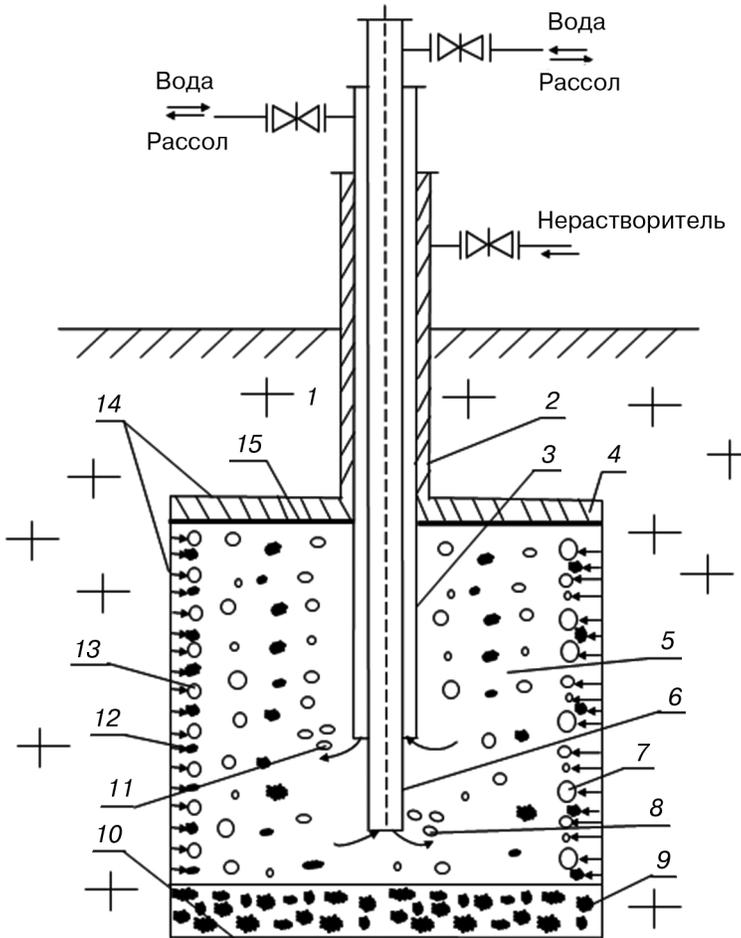
Гидродинамика взвешенных частиц в турбулентной среде отличается гораздо большей сложностью и интенсивностью, чем в ламинарной.

Для управления процессом строительства подземных выработок-емкостей применяют жидкие (например, дизельное топливо) или газообразные нерастворители, которые находятся в кровле выработки (рис. 2). На разных стадиях отработки подземной выработки-емкости нерастворитель перемещают и увеличивают высоту выработки-емкости.

На схеме стрелками справа стороны обозначен прямоток, слева — противоток. Растворитель представлен раствором с газовыми пузырями разных размеров и формы и с частицами нерастворимых пород также разных размеров и формы. Взвешенные частицы горных пород разной плотности и размеров, как и газовые пузыри, находятся во всем объеме раствора. С правой стороны схемы изображены процессы выделения газа из межкристаллического пространства и частиц нерастворимых пород при растворении соли с большим содержанием газа (характерно для растворения соли на Лейковском месторождении). С левой стороны схемы представлен процесс выделения газа из кристаллов соли и частиц нерастворимых пород при растворении соли с большим содержанием газа. Пузырьки газа выделяются из породы, а пузырьки воздуха выделяются из подаваемой в выработку-емкость воды.

Флотационный процесс при строительстве выработок-емкостей методом подземного растворения каменной соли через буровые скважины — процесс разделения мелких твердых частиц минералов и горных пород в соляном растворе в процессе строительства выработок-емкостей, когда в раствор происходит выделение частиц разрушенной горной породы и пузырьков газа при растворении каменной соли, а также выделение пузырьков воздуха из закачиваемой в выработку воды.

Процесс флотации характеризуется индивидуальной способностью различных минералов и горных пород к смачиванию в системе «жидкость — твердые частицы — газ». Несмачиваемыми соляным раствором являются гидрофобные частицы (рассолофобные). Гидрофильные частицы обладают хорошей смачиваемостью соляным раствором (рассолофильные).



**Рис. 2.** Принципиальная схема флотационных процессов при строительстве выработки-емкости методом подземного растворения каменной соли с большим содержанием газа: 1 — каменная соль; 2 — основная обсадная колонна; 3 — внешняя подвесная колонна; 4 — пенный слой; 5 — растворитель; 6 — центральная подвесная колонна; 7 — газовые пузыри из межкристаллического пространства каменной соли; 8 — газовые пузыри из воды при прямотоке; 9 — выпавшие нерастворимые включения; 10 — забой; 11 — газовые пузыри из воды при противотоке; 12 — взвешенные частицы горных пород; 13 — газовые пузыри из кристаллов каменной соли; 14 — контур выработки-емкости в процессе строительства; 15 — уровень раздела нерастворитель-рассол

Флотация — это процесс, при котором частицы минералов и горных пород в соляном растворе (рассоле) прилипают к газовым пузырькам и переходят вместе с ними в **пенный слой у кровли выработки-емкости** (слой дизельного топлива с газовыми пузырьками и твердыми частицами при применении в качестве нерастворителя дизельного топлива). Газовые пузырьки могут переносить в пенный слой некоторое количество раствора.

Процесс флотации — физико-химический процесс, который заключается в создании комплекса «пузырек — частица».

Процесс флотации (непосредственного образования комплекса из частицы и пузырька) происходит поэтапно: приближение пузырька к частице; соприкосновение пузырька и частицы; прилипание частицы к поверхности пузырька.

При протекании процесса флотации в подземной выработке-емкости происходит образование флотационных агрегатов (частиц минералов и пузырьков газа) — аэрофлокул (в общем случае, газофлокул).

У кровли выработки-емкости, которая сооружается с применением в качестве нерастворителя дизельного топлива образуется пенный слой. Образованный пенный слой отмечен при строительстве выработок-емкостей на Лейковском штоке, когда в каменной соли содержалось значительное количество газа. По составу газ практически чистый метан, который на поверхности при извлечении из рассола мог воспламениться.

Обобщенно флотация при строительстве выработок-емкостей методом подземного растворения каменной соли через буровые скважины характеризуется этапами: в процессе растворения каменной соли в соляной раствор выделяются газ и частицы нерастворимых минералов и пород; гидрофобные частицы сближаются с пузырьком газа; прослойка раствора между гидрофобной частицей и газовым пузырем постепенно истончается и разрывается в связи с тем, что сила взаимодействия между компонентами раствора больше, чем сила адгезивного контакта раствор — частица; образуется комплекс гидрофобной частицы с пузырьком газа; этот флотирующий комплекс всплывает в верхнюю часть выработки-емкости, так как он менее плотный, чем система, в которой он находится.

Пены — структурированные дисперсные системы, представляют собой скопление пузырьков газа (дисперсная фаза), разделенных тонкими прослойками жидкой дисперсионной среды. **Пенный слой у кровли выработки** на Лейковском месторождении представлен скоплением пузырьков газа, равномерно распределенным между тонкими прослойками из твердых частиц малого размера с дизельным топливом и раствором.

Частицы минералов и горных пород, находящиеся во взвешенном состоянии в растворе с пузырьками газа частично попадают в пенный слой у кровли выработки, частично выдаются вместе с раствором и пузырьками газа через скважину на поверхность, а более тяжелые частицы оседают на забое выработки-емкости.

В развитии теории флотации важную роль сыграли работы русских физико-химиков: И.С. Громека, впервые сформулировавшего в конце XIX века основные положения процесса смачивания; Л.Г. Гурвича, разработавшего в начале XX века положение о гидрофобности и гидрофильности. П.А. Ребиндер развил теорию адсорбционных и поверхностно-активных процессов, указал на роль флокуляции в процессе флотации. Теория взаимодействия реагентов с минералами при флотации развита И.Н. Плаксиным и его школой. Вопросы электрохимических взаимодействий при флотации впервые рассмотрел А.Н. Фрумкин, а затем Р.Ш. Шафеев и В.А. Чантурия [4].

Природные флотационные процессы при строительстве выработок-емкостей методом подземного растворения каменной соли протекают при подаче под давлением в выработку-емкость растворителя (воды) и выдаче рассола. По этому принципу природную флотацию в выработке-емкости можно отнести к напорной флотации.

Образование флотационных агрегатов (частиц и пузырьков газа) происходит при взаимодействии частиц с пузырьками газа. На флотацию влияют размер и

количество частиц и пузырьков газа; плотность частиц и раствора; физико-химические особенности частиц (гидрофобность или гидрофильность), состав газа (включение кислорода), гидродинамические условия, температура.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Малюков В.П.* Особенности строительства подземных выработок-емкостей для хранения газонефтепродуктов в каменной соли с большим содержанием газа // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: «Инженерные исследования»*. 2012. № 3. С. 36—48.
- [2] *Лантев А.Г., Башаров М.М., Фарахова А.И.* Явления турбулентного переноса тонкодисперсных частиц в жидкой фазе динамических сепараторов // *Научный журнал КубГАУ*. 2011. № 68(04). С. 1—31.
- [3] *Малюков В.П.* Образование колец Лизеганга в каменной соли с наночастицами // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016. № 10. С. 242—248.
- [4] *Чантурия В.А.* Химия поверхностных явлений при флотации. М.: Недра, 1977.

© Малюков В.П., Старовойтова Ю.И., 2017

#### История статьи:

Дата поступления в редакцию: май 2017

Дата принятия к печати: август 2017

#### Для цитирования:

**Малюков В.П., Старовойтова Ю.И.** Флотационные процессы при строительстве выработок-емкостей методом подземного растворения каменной соли с большим содержанием газа // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: «Инженерные исследования»*. 2017. Т. 18. № 3. С. 391—397. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-391-397

#### Сведения об авторах:

*Малюков Валерий Павлович*, кандидат технических наук, доцент департамента геологии, горного и нефтегазового дела инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Контактная информация:* e-mail: v.malyukov@mail.ru

*Старовойтова Юлия Игоревна*, магистрант департамента геологии, горного и нефтегазового дела инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Контактная информация:* e-mail: st.julia2010@yandex.ru

## **FLOTATION PROCESSES DURING THE CONSTRUCTION WORKINGS-TANKS BY UNDERGROUND DISSOLUTION OF ROCK SALT WITH A HIGH CONTENT OF GAS**

**V.P. Malyukov, Y.I. Starovoytova**

Peoples' Friendship University of Russia  
*Podolsk highway, 8/5, Moscow, Russia, 115149*

Analyzed experimental and field studies of flotation processes in the construction of mines-tanks for backup of hydrocarbons by the method of underground dissolution of rock salt with a high content of gas.

**Key words:** rock salt, underground production-capacity, bore, dis-solvent, disperse systems, herstorical, diesel fuel, gas, insoluble inclusions, flotation process, froth layer

### **REFERENCES**

- [1] Malyukov V.P. Peculiarities of construction of underground openings of storage tanks, gazonefteprovodov in rock salt with a high content of gas. *Bulletin of the Russian University of friendship of peoples. Series: "Engineering research"*. 2012. No. 3. P. 36–48.
- [2] Laptev A.G., Basharov M.M., Farakhov A.I. Phenomena turbulent transport of fine particles in the liquid phase of dynamic separators. *The scientific journal of the Kuban state agrarian University*. 2011. No. 68(04). S. 1–31.
- [3] Malyukov V.P. The Formation of rings of Liesegang in rock salt with nanoparticles. *Mining information-analytical Bulletin*. 2016. No. 10. P. 242–248.
- [4] Chanturia V.A. *The Chemistry of surface phenomena in flotation*. M.: Nedra, 1977.

#### **Article history:**

Received: May 2017

Accepted: August 2017

#### **For citation:**

**Malyukov V.P., Starovoytova Y.I. (2017) Flotation processes during the construction workings-tanks by underground dissolution of rock salt with a high content of gas. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(3), 391–397. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-391-397**

#### **Bio Note:**

*Valeriy P. Malyukov*, PhD (in Technical Sciences), associated professor Department of Geology, mining, oil and gas industry, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Contact information:* e-mail: v.malyukov@mail.ru

*Yulia I. Starovoytova*, graduate student of the Department of Geology, mining, oil and gas industry, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Contact information:* e-mail: st.julia2010@yandex.ru

ф. СП-1

ФГУП «ПОЧТА РОССИИ»

**АБОНЕМЕНТ** на журнал

**18230**

(индекс издания)

**ВЕСТНИК РУДН**  
**Серия «Инженерные исследования»**

Количество комплектов:

на 2017 год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

**ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА**

на журнал

**18230**

(индекс издания)

ПВ	место	литер

**ВЕСТНИК РУДН**

**Серия «Инженерные исследования»**

Стоимость	подписки	_____ руб. ____ коп.	Количество комплектов:	
	переадресовки	_____ руб. ____ коп.		

на 2017 год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

ф. СП-1

ФГУП «ПОЧТА РОССИИ»

**АБОНЕМЕНТ** на журнал

--

(индекс издания)

**ВЕСТНИК РУДН**

**Серия** \_\_\_\_\_

Количество комплектов:

--

на 2017 год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

**ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА**

ПВ	место	литер

на журнал

--

(индекс издания)

**ВЕСТНИК РУДН**

**Серия** \_\_\_\_\_

Стоимость	подписки	_____ руб. ____ коп.	Количество комплектов:	
	переадресовки	_____ руб. ____ коп.		

на 2017 год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**

---