

ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НАУЧНЫЙ

Серия **Авиационно-ракетное
и энергетическое машиностроение**

2023

Том 7, № 4

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-
КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ
МАШИНОСТРОЕНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
И ТЕХНОЛОГИЯ
ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ





ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК

Серия
«Авиационно-ракетное
и энергетическое
машиностроение»

Издается с октября 2017 г.
Выходит 4 раза в год

Том 7 № 4 2023

УЧРЕДИТЕЛЬ

Федеральное государственное
автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Омский государственный
технический университет»

Регистрационный номер
в реестре зарегистрированных
средств массовой информации
ПИ № ТУ55-00569 от 17.05.2018 г.
выдан Управлением Роскомнадзора
по Омской области

Сайт журнала:
<https://journals.omg.ru>

Страница журнала на сайте учредителя:
[http://www.omg.ru/
general_information/media_omgtu/
journal_of_omsk_research_journal/](http://www.omg.ru/general_information/media_omgtu/journal_of_omsk_research_journal/)

Подписной индекс
в каталоге Роспечать 80583

Ответственный секретарь
М. Ф. Федорчук

Редактор
Т. П. Сёмина

Компьютерная верстка
О. Н. Чирун

Макет обложки
В. С. Гуринов
М. Ф. Федорчук
Н. С. Плотникова

© Редакция журнала
«Омский научный вестник».
Серия «Авиационно-ракетное
и энергетическое
машиностроение», ОмГТУ

Подписано в печать 15.12.2023 г.
Дата выхода в свет 22.12.2023 г.

Формат 60x84 1/8
9,77 усл. печ. л.
Бумага офсетная

Отпечатано на дупликаторе
отдела научной информации ОмГТУ

Тираж 500 экз.
(1-й завод 1-100). Заказ 191
Цена свободная

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Шалай Виктор Владимирович (главный редактор), д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Юша Владимир Леонидович (заместитель главного редактора), д. т. н., профессор,
Омск, Россия

Краус Юрий Александрович (заместитель главного редактора), к. т. н., доцент,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Андреева Елена Григорьевна, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Анисимов Сергей Михайлович, д. т. н., профессор,
Вроцлавский политехнический университет, Вроцлав, Польша

Блинов Виктор Николаевич, д. т. н., профессор,
КБ «Полет» — филиал АО «ГКНПЦ им. М. В. Хруничева», Омск, Россия

Бурьян Юрий Андреевич, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Галфетти Лучано, профессор,
Миланский политехнический университет, Милан, Италия

Горюнов Владимир Николаевич, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Дворников Леонид Трофимович, д. т. н., профессор,
Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

Жарковский Александр Аркадьевич, д. т. н., профессор,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

Животкевич Игорь Николаевич, д. т. н., профессор,
АНО «Институт испытаний и сертификации вооружения и военной техники»,
Москва, Россия

Карагузов Владимир Иванович, д. т. н., старший научный сотрудник,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Клюшников Валерий Юрьевич, д. т. н., старший научный сотрудник,
АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», г. Москва,
Россия

Ковачевич Ахмед, профессор,
Лондонский университет Сити, Лондон, Великобритания

Корнеев Сергей Александрович, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Коротяев Дмитрий Николаевич, д. т. н., профессор,
Российский государственный геологоразведочный университет
имени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Россия

Кропотин Олег Витальевич, д. т. н., доцент,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Куденцов Владимир Юрьевич, д. т. н., доцент,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Кузнецов Виктор Иванович, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Милованчевич Урош, доктор, профессор,
Белградский университет, Белград, Сербия

Негров Дмитрий Анатольевич, к. т. н., доцент,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Полещенко Константин Николаевич, д. т. н., профессор,
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Россия

Пустовой Николай Васильевич, д. т. н., профессор,
Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Савин Леонид Алексеевич, д. т. н., профессор,
Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, Орел, Россия

Сулин Александр Борисович, д. т. н.,
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

Теплоухов Андрей Анатольевич, к. т. н., доцент,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Трушляков Валерий Иванович, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Чернышев Андрей Владимирович, д. т. н., профессор,
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Чугунков Владимир Васильевич, д. т. н., профессор,
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Щерба Виктор Евгеньевич, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Юн Владимир Климентьевич, д. т. н.,
АО «Невский завод», г. Санкт-Петербург, Россия



OMSK SCIENTIFIC BULLETIN

Series
«Aviation-Rocket
and Power
Engineering»

Published Since October 2017
4 Times per Year

Volume 7 No. 4 2023

FOUNDER

Federal State
Autonomous Educational Institution
of Higher Education
«Omsk State Technical University»

Identification number of registered Mass Media
ПМ № ТУ55-00569 from 17.05.2018
issued by the Federal Service for
Supervision of Communications,
Information Technology, and Mass Media,
Omsk region

Journal Website:
<https://journals.omgto.ru>

Journal Page on Founder's Website:
[http://www.omgto.ru/
general_information/media_omgtu/
journal_of_omsk_research_journal/](http://www.omgto.ru/general_information/media_omgtu/journal_of_omsk_research_journal/)

Subscription Index
in Federal Agency on Press and Mass
Communications Catalog 80583

Executive Secretary
M. F. Fedorchuk

Editor
T. P. Semina

Computer Page-Proofs
O. N. Chirun

Cover Layout
V. S. Gurinov
M. F. Fedorchuk
N. S. Plotnikova

© Editorial Board of
«Omsk Scientific Bulletin».
Series «Aviation-Rocket
and Power Engineering», Omsk State Technical University

Signed in Print 15.12.2023
Date of Publication 22.12.2023

Format 60x84 1/8
Conventional
Printed Sheets 9,77
Offset Paper

Printed on a Duplicator
at Scientific Publishing Office,
Omsk State Technical University

Circulation 500 Copies.
(The 1st Printing Factory 1–100)
Order 191
Open Price

EDITORIAL STAFF

Shalay Viktor Vladimirovich, (Chief Editor), D. Sc. (Engineering), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Yusha Vladimir Leonidovich, (Deputy Chief Editor), D. Sc. (Engineering), Professor,
Omsk, Russia

Kraus Yuri Aleksandrovich (Deputy Chief Editor), Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Andreeva Elena Grigoryevna, D. Sc. (Engineering), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Anisimov Sergey Mikhailovich, D. Sc. (Engineering), Professor,
Wroclaw University of Science and Technology, Wroclaw, Poland

Blinov Viktor Nikolayevich, D. Sc. (Engineering), Professor,
Design Bureau «Polet» — branch Khrunichev State Research and Production Space Center,
Omsk, Russia

Burian Yuriy Andreevich, D. Sc. (Engineering), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Galfetti Luciano, Professor,
Politecnico di Milano, Milan, Italy

Goryunov Vladimir Nikolaevich, D. Sc. (Engineering), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Dvornikov Leonid Trofimovich, D. Sc. (Engineering), Professor,
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Zharkovskii Aleksandr Arkadievich, D. Sc. (Engineering), Professor,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

Zhivotkevich Igor Nikolayevich, D. Sc. (Engineering), Professor,
Institute of Testing and Certification of Weapon and Military Equipment, Moscow, Russia

Karagusev Vladimir Ivanovich, D. Sc. (Engineering), Senior Researcher,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Klyushnikov Valeriy Yur'yevich, D. Sc. (Engineering), Senior Researcher,
JSC «Central Research Institute for Machine Building» (JSC «TsNIMash»), Moscow, Russia

Kovačević Ahmed, Professor,
University of London, City, London, United Kingdom

Korneyev Sergey Aleksandrovich, D. Sc. (Engineering), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Korotaev Dmitriy Nikolayevich, D. Sc. (Engineering), Professor,
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI),
Moscow, Russia

Kropotin Oleg Vitalyevich, D. Sc. (Engineering), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Kudentsov Vladimir Yurievich, D. Sc. (Engineering), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Kuznetsov Viktor Ivanovich, D. Sc. (Engineering), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Milovančević Uroš, PhD Mechanical Engineering,
University of Belgrade, Belgrade, Serbia

Negrov Dmitriy Anatolyevich, Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Poleshchenko Konstantin Nikolayevich, D. Sc. (Engineering), Professor,
Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

Pustovoy Nikolay Vasilievich, D. Sc. (Engineering), Professor,
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Savin Leonid Alexeevich, D. Sc. (Engineering), Professor,
Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia

Sulin Aleksandr Borisovich, D. Sc. (Engineering),
Saint Petersburg National Research University of Informational Technologies,
Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia

Teploukhov Andrey Anatolyevich, Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Trushlyakov Valeriy Ivanovich, D. Sc. (Engineering), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Chernyshev Andrey Vladimirovich, D. Sc. (Engineering), Professor,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Chugunkov Vladimir Vasilievich, D. Sc. (Engineering), Professor,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Scherba Viktor Evgeniyevich, D. Sc. (Engineering), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Yun Vladimir Klimentievich, D. Sc. (Engineering),
JSC «REPH», Saint Petersburg, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

А. Г. Никифоров, Л. А. Муслова. Влияние подвижности стенки на массовый расход в тихоходной длинноходовой ступени	9
В. А. Пронин, А. В. Кованов, В. А. Цветков, Е. Н. Михайлова, П. А. Белов. Оценка степени влияния фактора подвижности стенок щели при расчёте величины протечек в рабочей части спирального компрессора. Часть 2	15
В. Л. Юша, М. А. Сутягинский, А. Ю. Громов, П. В. Ушаков, Ю. А. Потапов. О взаимосвязи цифровых технологических платформ крупных химических и нефтеперерабатывающих производств с техническим обликом парка компрессорного оборудования	25
Е. В. Дубинин, Б. Ф. Идиятуллин, Н. Г. Хасанов. Оптимизация ступеней центробежных компрессоров	33
Д. В. Мылкин, А. В. Волков, Б. М. Орахелашвили, А. А. Дружинин, В. Ю. Ляпин. Метод оценки теоретических характеристик малых осевых гидротурбин	40

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

В. Н. Блинов, В. В. Косицын, А. И. Лукьянчик, П. В. Степень, П. С. Ячменев. Автономные экспериментальные исследования электротермического микродвигателя с двумя автономными нагревательными элементами для наноспутников	48
В. И. Рубан, В. Н. Блинов, В. В. Косицын, А. И. Лукьянчик, П. С. Ячменев, П. В. Степень. Построение траектории малого космического аппарата для облета базового космического аппарата с целью наружного осмотра и оценка энергетических затрат на маневр облета	56
Е. П. Злобин, А. И. Хаймович, А. В. Балякин. Влияние вибрационной обработки на шероховатость и геометрические характеристики изделий из алюминиевого сплава AlSi10Mg, полученных с помощью технологии СЛС	65
М. В. Смагин, Е. Е. Колягин, И. С. Вавилов. Анализ работоспособности dilatометрического микродвигателя с полимерными рабочими компонентами	72

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Д. А. Негров, В. Ю. Путинцев, А. И. Глов, Д. А. Вебер. Влияние ультразвуковых колебаний с наложенной низкочастотной модуляцией на механические, трибологические свойства и структуру многокомпонентного полимерного композита	79
--	----

Требования к оформлению научных статей, направляемых в журнал «Омский научный вестник». Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение»	5
--	---

CONTENTS

POWER AND CHEMICAL ENGINEERING

- A. G. Nikiforov, L. A. Muslova.** The effect of wall mobility on mass flow in a slow-moving long-stroke stage 9
- V. A. Pronin, A. V. Kovanov, V. A. Tsvetkov, E. N. Mikhailova, P. A. Belov.** Assessment of the influence of gap wall mobility factor at calculation of leakage in working section of a scroll compressor. Part 2 15
- V. L. Yusha, M. A. Sutyaginskiy, A. Yu. Gromov, P. V. Ushakov, Yu. A. Potapov.** On the relationship of digital technological platforms of large chemical and oil refining industries with the technical appearance of the compressor equipment fleet 25
- E. V. Dubinin, B. F. Idiyatullin, N. G. Khasanov.** Optimization of centrifugal compressor stages 33
- D. V. Mylkin, A. V. Volkov, B. M. Orakhelashvili, A. A. Druzhinin, V. Yu. Lyapin.** Method for assessing the theoretical characteristics of small axial hydraulic turbines 40

AVIATION AND ROCKET-SPACE ENGINEERING

- V. N. Blinov, V. V. Kositsyn, A. I. Lukyanchik, P. V. Stepen, P. S. Yachmenev.** Autonomous experimental studies resistojet with two autonomous heating elements for nanosatellites 48
- V. I. Ruban, V. N. Blinov, V. V. Kositsyn, A. I. Lukyanchik, P. S. Yachmenev, P. V. Stepen.** Constructing the trajectory of a small spacecraft for flying around the base spacecraft for the purpose of external inspection and estimating the energy costs for the flyby maneuver 56
- E. P. Zlobin, A. I. Khaimovich, A. V. Balyakin.** Investigation of the process of vibration processing of AlSi10Mg aluminum alloy samples obtained by SLS technology 65
- M. V. Smagin, E. E. Kolyagin, I. S. Vavilov.** The analysis of operability of dilatometric microthruster with polymer working components 72

MATERIAL SCIENCE AND PROCESSING TECHNOLOGY

- D. A. Negrov, V. Yu. Putintsev, A. I. Glotov, D. A. Veber.** The effect of ultrasonic vibrations with superimposed low-frequency modulation on the mechanical, tribological properties and structure of a multicomponent polymer composite 79

**Scientific Article Submission Guidelines for the Journal Omsk Scientific Bulletin.
Series Aviation-Rocket and Power Engineering**

7

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ

О содержании. Статья должна содержать только оригинальный материал, отражающий результаты исследований автора (авторов), не опубликованный ранее и не направленный для рассмотрения в другие издания.

О рассмотрении поступивших материалов. На первом этапе все научные статьи проходят обязательную проверку на наличие заимствований. Материалы, содержащие менее 70 % уникального текста и не соответствующие действующим требованиям оформления статей, возвращаются автору (авторам). Статьи, прошедшие проверку на уникальность текста и соответствие тематике научных направлений журнала, редакция направляет на рецензирование. Высказанные замечания передаются автору (авторам). После доработки материалы вновь рассматривают рецензенты, после чего принимается решение о направлении в печать.

Об оформлении. Статью необходимо набрать в текстовом редакторе Word (с расширением *.doc или *.docx) (шрифт — Times New Roman Cyr 14 пт, абзацный отступ — 0,5 см, межстрочный интервал — полуторный, **без переносов в словах**). Распечатать на бумаге форматом A4 (210×297 мм).

Оригинал должен быть чистым, не согнутым, без ручных правок. Страницы должны быть пронумерованы карандашом на обороте. Объем статьи — **16–18** страниц, включая рисунки и таблицы (без учета аннотации, ключевых слов, списка источников и сведений об авторах); при этом собственно текст — не менее **6–7** страниц.

Поля: сверху и снизу — по 2,5 см; слева и справа — по 2 см.

Заголовок. В верхнем левом углу листа проставляется УДК. Далее, по центру, печатается название статьи (**прописная буква только первая**). В названии статьи нельзя использовать аббревиатуры. Ниже — инициалы, фамилия автора (авторов), строкой ниже — полное название организации, далее через запятую — страна, почтовый индекс, город, название улицы, номер дома.

Ниже через строку помещаются текст аннотации и ключевые слова на русском языке.

Аннотация должна отражать основную тему статьи, её актуальность, цель и задачи исследования, а также его результаты. В аннотации автор (авторы) указывает, что нового несет в себе данная работа в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению. Рекомендуемый средний объем аннотации — от 500 печатных знаков.

Ключевые слова — 6–8 слов/словосочетаний, которые должны отражать специфику темы, субъект и результаты исследования. Следует избегать слов/словосочетаний общего характера. При подборе ключевых слов рекомендуется использовать термины и словосочетания, используемые в исследуемых областях.

Далее через строку помещают основной текст статьи.

Текст статьи должен быть структурирован и содержать следующие разделы: «Введение», «Постановка задачи», «Теория», «Результаты экспериментов», «Обсуждение результатов», «Выводы и заключение».

Раздел **«Введение»** включает актуальность темы исследования, обзор литературы по теме исследования (исходные гипотезы, если они существуют), объект исследования, постановку проблемы.

Постановка задачи должна вытекать из результатов обзора литературы и содержать сформулированную цель и перечень намеченных к решению задач.

В разделе **«Теория»** размещаются теоретический анализ и теоретические исследования.

Разделы **«Результаты экспериментов»** и **«Обсуждение результатов»** содержат соответственно фактические результаты исследования (текст, таблицы, графики, диаграм-

мы, уравнения, рисунки) и интерпретацию полученных результатов исследования.

В разделе **«Выводы и заключение»** содержатся краткие итоги разделов статьи без повторения формулировок, приведенных в них.

Строкой ниже размещаются, если есть, **Благодарности**.

Если в тексте есть **примечания**, то после основного текста, перед списком источников, набирается по центру заголовок «Примечания» и через строку помещаются тексты примечаний, пронумерованные числом в виде верхнего индекса (например, ¹⁾) в порядке ссылок по тексту. **Ссылка на примечание** в основном тексте оформляется числом в виде верхнего индекса с полужирным начертанием (например, ... модели¹⁾). Автоматическая нумерация примечаний не допускается.

Формулы. Простые внутристроочные и одностроочные формулы, не содержащие специальных символов (отсутствующих на клавиатуре), должны быть набраны символами с клавиатуры без использования специальных редакторов. Одиночные специальные символы, отсутствующие на клавиатуре, формулы, содержащие специальные символы, отсутствующие на клавиатуре, а также сложные и многостроочные формулы должны быть целиком набраны в редакторе формул **Microsoft Equation 3.0** или **MathType**. Не допускается набор части формулы символами, а части — в редакторе формул. Если в тексте статьи формулы нумеруются, то эту нумерацию следует выполнять набором чисел. Автоматическая нумерация не допускается.

Список источников. Ниже основного текста печатается по центру заголовок «Список источников» и через строку помещается пронумерованный перечень источников в порядке ссылок по тексту в соответствии с действующими требованиями редакции к библиографическому описанию. В одном пункте перечня следует указывать только один источник информации.

Количество ссылок на источники информации — **не менее 15–20 источников**:

- обязательное цитирование современных работ (оценивается доля цитируемых публикаций, изданных по тематике статьи за последние 5 лет);

- наличие баланса между ссылками на отечественные и иностранные публикации (показывает, насколько автор (авторы) рукописи владеют современным состоянием проблемы в России и за рубежом);

- доля ссылок на статьи автора (авторов), изданных ранее, не должна превышать 20 % от общего количества ссылок.

Ссылки на источники информации нумеруются последовательно, по мере упоминания в тексте, и обозначаются числами, заключенными в квадратные скобки (например, [1]). Если ссылка на источник информации в статье упоминается неоднократно, то повторно в квадратных скобках указывается его номер из списка (без использования в списке источников следующего порядкового номера и ссылки «Там же»). В случае, когда ссылаются на различные материалы из одного источника, в квадратных скобках указывают каждый раз еще и номер страницы, например, [1, с. 17] или [1, с. 28–29].

Таблицы помещаются на новой странице после **списка источников**. Нумерация таблиц производится в порядке ссылок по тексту. Нумерационный заголовок таблицы набирается шрифтом с полужирным начертанием с выравниванием по левому краю.

Названия таблиц приводятся одновременно на русском и английском языках:

Таблица 1. Название на русском языке
Table 1. Title of the table in English

Ссылка на таблицу в основном тексте оформляется шрифтом с полужирным начертанием в скобках — например, **(табл. 1)**.

Допускается не более **8–10 таблиц**.

Рисунки последовательно размещаются на новой странице после таблиц (или **списка источников**). Нумерация рисунков производится в порядке ссылок по тексту. Нумерационный заголовок набирается шрифтом с полужирным начертанием с выравниванием по центру рисунка.

Названия рисунков приводятся одновременно на русском и английском языках:

Рис. 1. Название на русском языке
Fig. 1. Title of the figure in English

Ссылка на рисунок в основном тексте оформляется шрифтом с полужирным начертанием и в скобках — например, **(рис. 1)**. Рисунки могут быть сканированными с оригинала (с разрешением 150–300 dpi) или выполнены средствами компьютерной графики и сохранены в форматах JPEG, BMP, PSD. Объем файла рисунка не должен превышать **3 Мб**. Использование графики в формате MS Visio, различных CAD и других программ не допускается. Рисунки должны быть четкими. Все позиции на рисунке должны быть расшифрованы и описаны. Легенда рисунка должна быть легко читаемой, шрифт не менее 8–9 пт. Допускается, а в случае с иллюстрациями большого объема (файла) приветствуется, размещение рисунков в отдельном файле электронной версии. Название рисунка ставится непосредственно под рисунком и не должно включаться в формат рисунка.

Допускается не более **8–10 рисунков**.

На последней странице указать следующие **сведения об авторе (авторах)**: фамилию, имя, отчество; ученую степень, ученое звание, должность, место работы, номер телефона (не публикуется); адрес для переписки; для иногородних авторов — почтовый адрес, на который отправляется журнал в случае публикации их статьи; SPIN-код, AuthorID (РИНЦ), ORCID, AuthorID (SCOPUS), ResearcherID.

На отдельной странице размещается англоязычная часть статьи.

В верхнем левом углу листа **на английском языке** проставляется UDC (УДК). Далее, по центру, печатается название статьи (**прописная буква только первая**) на английском языке.

Ниже на английском языке — инициалы, фамилия автора (авторов), строкой ниже — полное название организации, далее через запятую — страна, город, название улицы, номер дома, почтовый индекс.

Строкой ниже — **аннотация и ключевые слова**.

Аннотация должна быть информативной, отражать основное содержание статьи и результаты исследования.

Объем 150–250 слов. Не должна быть дословным переводом русской версии.

Keywords (Ключевые слова) располагают под аннотацией — 6–8 слов/словосочетаний. Должны отражать специфику темы, субъект и результаты исследования. Следует избегать слов/словосочетаний общего характера. При подборе ключевых слов рекомендуется использовать термины и словосочетания, используемые в исследуемых областях.

Строкой ниже размещаются, если есть, **Acknowledgments** (Благодарности).

Строкой ниже размещается **список источников** на латинице, называемый **References** (применяется для описания только русскоязычных источников. Источники на иностранных языках указываются в соответствии с действующими требованиями редакции к библиографическому описанию).

Схема описания в References:

1. Авторы (Фамилия И. О.) — транслитерация.
2. Название статьи — транслитерация.
3. Название статьи на английском языке в **квадратных скобках**.
4. Название издания — транслитерация.
5. Название издания на английском языке.
6. Выходные данные: место издания, год, номер, страницы — на английском языке.
7. В конце ссылки в круглых скобках указать на английском языке язык оригинала источника, например, (In Russ.).

После **References** размещаются следующие **сведения об авторе (авторах) на английском языке**: фамилия, имя, отчество (транслитерация); ученая степень, ученое звание, должность, место работы, номер телефона (не публикуется); адрес для переписки; SPIN-код, AuthorID (РИНЦ), ORCID, AuthorID (SCOPUS), ResearcherID.

Для транслитерации использовать стандарт BGN (United States Board on Geographic Names) <http://www.translitteration.com/transliteration/en/russian/bgn-pcgn/>

В редакцию необходимо предоставить распечатанный вариант статьи (с личной подписью автора (авторов)) и электронную версию на любом из носителей или отправить по e-mail: **onv@omgtu.ru**.

Распечатанный вариант статьи, оригинал экспертного заключения о возможности открытого опубликования отправить по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, ОмГТУ, редакция журнала «Омский научный вестник».

Тел. 8 (3812) 65-32-08, e-mail: **onv@omgtu.ru**

Стандарт **BGN** (United States Board on Geographic Names)
<http://www.translitteration.com/transliteration/en/russian/bgn-pcgn/>

А	Б	В	Г	Д	Е	Ё	Ж	З	И	Й	К	Л	М	Н	О	П	Р	С	Т	У	Ф	Х	Ц	Ч	Ш	Щ	Ъ	Ы	Ь	Э	Ю	Я
A	B	V	G	D	E, YE	E, YE	ZH	Z	I	Y	K	L	M	N	O	P	R	S	T	U	F	Kh	TS	CH	SH	SHCH	"	Y	'	E	YU	YA

SCIENTIFIC ARTICLE SUBMISSION GUIDELINES

About the content. The article should contain only original material reflecting the results of the author's research not previously published and not submitted to other publications.

On the review of the submitted materials. At the first stage all scientific articles undergo mandatory testing for borrowings. Articles containing less than 70 % of the unique text and violating publishing requirements are returned to the author (authors). Articles that have passed the verification of the uniqueness of the text and following the journal profile are sent for reviewing. The comments are transmitted to the author (authors). After the finalization, the reviewers analyze the materials again, after which the decision for publication is made.

Article format. The article should be typed in a text editor Word (with the extension *.doc or *.docx) (font — Times New Roman Cyr 14 pt, indentation — 0,5 cm, line spacing — one and a half **without hyphenation in words**). Print on paper in A4 format (210×297 mm). Pages should be numbered with a pencil on the back. The volume of the article is 16–18 pages, including figures and tables (excluding annotations, keywords, bibliographic list and information about authors); the text of the article should be at least 6–7 pages.

Margins: from above and from below — on 2,5 cm; left and right — 2 cm.

Header. In the upper left corner of the sheet the UDC is placed. Further, in the center, the title of the article is printed (**the capital letter is only the first**). The title of the article can not be abbreviated. Below there are initials, the author's (authors') surname, the line below — the full name of the organization, through the comma — country, city, street name, house number, postcode.

Below the line the text of the annotation and keywords in Russian are placed.

The **abstract** should reflect the main topic of the article, its relevance, purpose and objectives, as well as its results. In the annotation, the author (authors) indicates that the work is new in comparison with others related to the topic and purpose. The recommended average annotation volume is over 500 characters.

Keywords — 6–8 words/phrases, which should reflect the specifics of the topic, the subject and the results of the research. It is necessary to avoid common words and phrases. When selecting keywords, it is recommended to use terms and phrases used in the areas researched.

Next, the main text of the article is placed through the line.

The text of the article should be structured and contain the following sections: «Introduction», «Statement of the problem», «Theory», «Experimental results», «Discussion of experiments», «Conclusions».

If there are **notes** in the text, after the main text, before the Source list, the title «Notes» is typed in the center and the text of the notes, numbered in the form of an upper index (for example, ¹) in the order of the references in the text, is placed through the line. **The reference to the note** in the main text is bolded with a number in the form of an upper index (for example, ...models¹). Automatic numbering of the notes is not allowed.

The «**Introduction**» section includes the relevance of the research topic, a review of the literature on the research topic (the initial hypotheses, if they exist), the object of the study, the statement of the problem.

The **Statement of the problem** should follow from the results of the literature review and contain the formulated goal and a list of tasks to be solved.

The section «**Theory**» contains theoretical analysis and theoretical studies.

The sections «**Results of experiments**» and «**Discussion of results**» contain the actual results of the research (text, tables,

graphs, diagrams, equations, figures) and interpretation of the results of the research, respectively.

The section «**Conclusions**» contains brief summaries of the sections of the article without repeating the formulations given in them.

Formulas. Simple inline and single-line formulas that do not contain special characters (absent on the keyboard) must be typed with symbols from the keyboard without using special editors. Single special characters that are not present on the keyboard, formulas containing special characters that are not on the keyboard, and complex and multi-line formulas must be typed entirely in the **Microsoft Equation 3.0** or **MathType** formula editor. It is not allowed to type part of the formula with symbols, and parts in the formula editor. If in the text of the article the formulas are numbered, then this numbering should be performed by a set of numbers. Automatic numbering is not allowed.

List of sources. Below the main text, the title «List of sources» is printed down the line and a numbered source list is placed through the line in the order of the text references in accordance with the current editorial requirements for the bibliographic description. Only one source of information should be indicated in one item of the list.

The text of the article should contain references to information sources (at least 15–20 sources).

— obligatory citation of modern works (the share of quoted publications published on the subject of the article is estimated over the past 5 years);

— the existence of a balance between references to domestic and foreign publications (shows how much the author (authors) of the manuscript know the current state of the problem in Russia and abroad);

— the share of links to the articles of the author (authors) published earlier should not exceed 20 % of the total number of references.

References to information sources are numbered sequentially, as far as they are mentioned in the text, and are denoted by numbers enclosed in square brackets (for example, [1]). If the reference to the source of information in the article is mentioned repeatedly, then its number from the list is repeated in square brackets (without using the next sequence number and the link «Ibid» in the Source list). In the case when they refer to different materials from the same source, the page number is also indicated in square brackets each time, for example, [1, p. 17] or [1, p. 28–29].

Tables are placed on a new page after the Source list. The numbering of tables is made in the order of the references in the text. The numbering header of the table is typed in a font with boldface, aligned to the left.

Table names are given simultaneously in Russian and English:

Table 1. Name in Russian
Table 1. Title of the table in English

The reference to the table in the main text is drawn in a font with boldface in parentheses — for example, (**Table 1**).

No more than **8–10 tables** are allowed.

Figures are sequentially placed on a new page after the tables (or the Source list). The numbering of figures is made in the order of the references in the text. The numbering header is typed in a font with boldface, aligned to the center of the picture.

The names of the figure are given simultaneously in Russian and English:

Fig. 1. Name in Russian
Fig. 1. Title of the figure in Russian

The reference to the figure in the main text is made in a font with boldface and in parentheses — for example, (**Fig. 1**). Figures can be scanned from the original (with a resolution

of 150–300 dpi) or executed by means of computer graphics and saved in the formats JPEG, TIFF, BMP, PSD. The file size of the figure should not exceed 3 MB. The use of graphics in MS Visio format, various CAD and other programs is not allowed. Figures should be clear. All positions in the figure must be decoded and described. The legend of the figure should be easy to read, the font is not less than 8–9 pt. It is allowed, and in the case of illustrations of a large volume (file), the placement of pictures in a separate electronic version file is welcome. The name of the figure is placed directly under the figure and should not be included in the format of the figure.

No more than **8–10 figures** are allowed.

On the last page indicate the following **information about the author (authors)**: surname, name, patronymic; academic degree, academic title, position, place of work, telephone number (not published); address for correspondence; for nonresident authors — the postal address to which the journal is sent in case of publication of their article; SPIN-code, AuthorID (RSCI), ORCID, AuthorID (SCOPUS), ResearcherID.

A separate page contains the English-language part of the article.

In the upper left corner of the sheet **in English**, the UDC is affixed. Further, in the center, the title of the article is printed (**the capital letter is only the first**) in English.

Below in English — initials, author (authors) surname, the line below — the full name of the organization, followed by a comma — country, city, street name, house number, post-code.

The line below is an **Abstract** and **Keywords**.

The **Abstract** should be informative, reflect the main content of the article and the results of the research. The volume is 150–250 words. It should not be a literal translation of the Russian version.

Keywords are placed under the annotation — 6–8 words/phrases, which should reflect the specifics of the topic, the subject and the results of the research. It is necessary to avoid

common words and phrases. When selecting keywords, it is recommended to use terms and phrases used in the areas researched.

The line below is, if any, **Acknowledgments**.

The line below is the **List of Sources** in Latin, called **References**.

Description of References:

1. Authors (Surname, Name, Second Name) — transliteration.
2. The title of the article is transliteration.
3. The title of the article in English in square brackets.
4. The title of the publication is transliteration.
5. Name of the publication in English.
6. Imprint: place of publication, year, number, pages — in English.
7. At the end of the link in parentheses, indicate the source language in English, for example, (In Russ.).

After **References** the following **information about the author (authors) in English** is placed: surname, name, patronymic; academic degree, academic title, position, place of work, telephone number (not published); address for correspondence; for nonresident authors — the postal address to which the journal is sent in case of publication of their article; SPIN-code, AuthorID (RSCI), ORCID, AuthorID (SCOPUS), ResearcherID.

For transliteration use the standard **BGN** (United States Board on Geographic Names) <http://www.transliteration.com/transliteration/en/russian/bgn-pcgn/>

It is necessary to submit a printed version of the article (with a personal signature of the author (authors)) and an electronic version of the article (send by e-mail: **onv@omgtu.ru**), the original expert conclusion on the possibility of open publication and author agreement.

Address: 644050, Omsk, Mira Ave., 11, Building 6, Office 424, OmSTU, the Editorial Board of the journal Omsk Scientific Bulletin.

Tel. +7(3812) 65-32-08, e-mail: onv@omgtu.ru

Standard **BGN** (United States Board on Geographic Names)
<http://www.transliteration.com/transliteration/en/russian/bgn-pcgn/>

А	Б	В	Г	Д	Е	Ё	Ж	З	И	Й	К	Л	М	Н	О	П	Р	С	Т	У	Ф	Х	Ц	Ч	Ш	Щ	Ъ	Ы	Ь	Э	Ю	Я
A	B	V	G	D	E	YE	ZH	Z	I	Y	K	L	M	N	O	P	R	S	T	U	F	KH	TS	CH	SH	SHCH	“	Y	‘	E	YU	YA

ВЛИЯНИЕ ПОДВИЖНОСТИ СТЕНКИ НА МАССОВЫЙ РАСХОД В ТИХОХОДНОЙ ДЛИННОХОДОВОЙ СТУПЕНИ

А. Г. Никифоров¹, Л. А. Муслова²

¹Смоленская государственная сельскохозяйственная академия,
Россия, 214000, г. Смоленск, Большая Советская улица, 10/2

²Санкт-Петербургский университет МВД,
Россия, 198206, г. Санкт-Петербург, ул. Летчика Пилютова, д. 1

В современных моделях и методиках расчета существующих быстроходных поршневых компрессоров подвижность стенок не учитывается из-за незначительной величины и незначительного влияния на эффективность рабочего процесса. Тихоходные поршневые машины, разрабатываемые в настоящее время в Омском государственном техническом университете, имеют ряд особенностей — в первую очередь, удлиненный цилиндр, подверженный большим деформациям по сравнению с существующими аналогами, и длительное время сжатия. Что, естественно, значительно влияет на протекание рабочего процесса. Проведенные исследования показали, что не учет подвижности стенок может привести к значительным погрешностям, получаемым при моделировании рабочего процесса тихоходных поршневых компрессоров.

Ключевые слова: поршневой компрессор, массовые утечки, математическое моделирование, режим работы.

Введение

Цилиндропоршневые уплотнения оказывают существенное влияние на экономичность и срок службы не только поршневых компрессоров, а также и поршневых детандеров. Повышение качества цилиндропоршневого уплотнения вызывает значительные трудности, поскольку уменьшение утечек часто увеличивает выделение тепла трения.

Как правило, в холодильных поршневых компрессорах отсутствуют поршневые кольца, роль уплотнений выполняют кольцевые проточки, но при диаметре цилиндра более 50 мм необходимо устанавливать цилиндропоршневые уплотнения (компрессионные кольца, манжетные уплотнения). Цилиндропоршневые уплотнения выполняют несколько основных функций. Помимо герметизации рабочей камеры, поршневые кольца являются мостиком передачи тепла от поршня к стенкам цилиндра, а также регулируют распределение масла в цилиндрах.

Известно, что технологический ресурс работы поршневых колец, выполненных из полимерных антифрикционных материалов поршневых холодильных машин, ограничивается воздействием переменной тепловой и химической активности среды, вдобавок все это сопровождается высокой температурой рабочего тела. При расчете массовых утечек рабочей среды из замкнутой рабочей камеры (как газов, так и жидкостей) необходимо уделить должное внимание изучению теории течения в капиллярных щелях. Радиальный размер капиллярной щели измеряется, как правило, в микронах и лежит в диапазоне от 1–10 мкм.

Чаще всего в капиллярных щелях размер зазора обеспечивается в микронах. Также известно применение в качестве цилиндропоршневых уплотнений — лабиринтных (щелевых уплотнений). Принцип ра-

боты щелевых уплотнений основан на ступенчатом дросселировании газа от одной камеры к другой, а также за счет трения вязких сред о стенки расширительных камер.

Согласно источникам [1–10], течение вязкой жидкости в капиллярных щелях (до определённого размера щели) подчиняется общим законам механики жидкости и газа. Число Рейнольдса, при превышении которого нарушается ламинарность потока, соответствует значениям — $Re = 1000–1200$.

При расчете массовых утечек через щелевые зазоры (если их размер не превышает 10–15 мкм и давления 20 МПа) пользуются общеизвестными формулами для ламинарного режима работы. Турбулентный режим течения рабочей среды возникает при высоких давлениях (свыше 20 МПа) и значительной температуре.

В быстроходных схемах, как известно, уменьшение производительности за счёт утечек рабочего тела незначительно и не превышает 2–4 % [11–13]. Если рассмотреть тихоходные объёмные машины (данное направление активно развивается на кафедре «Холодильная и компрессорная техника и технология» Омского государственного технического университета), то по проведённым исследованиям [14–17] фактор утечек значительно превосходит остальные составляющие коэффициента подачи, включая и объёмный коэффициент. Связано это с особенностью конструкции ступени, где вытянутая форма цилиндра (относительная длина — отношение хода поршня к диаметру цилиндра) на порядок и более превосходит существующие рекомендации для быстроходных машин. В связи с этим конструкция цилиндра представляет собой заземлённую с двух сторон балку, радиальные деформации которой приводят к значительным утечкам. К тому же низкая скорость движения поршня также способствует увеличению утечек.

Помимо холодильных и поршневых компрессоров исследование течения жидкостей через цилиндропоршневые уплотнения в двигателях внутреннего сгорания широко освещены в работах [1–4]. Авторами данных работ получены эмпирические зависимости, позволяющие рассчитать утечку газа в зависимости от режимов работы двигателя. Выявлено, что наиболее ощутимое влияние на величину утечки и характер течения газа оказывают параметры рабочего процесса.

В работе [7] автор обобщил ранее полученные результаты по коэффициенту расхода для расчета массовых утечек через цилиндропоршневые уплотнения двигателя внутреннего давления. Дополнительно была разработана методика расчета массовых утечек при износе поршневых колец, которая показывает, что зазор в замке не является основным сечением для истечения газа, а составляет лишь от 10 до 20 % от площади общего зазора.

М. Эйвас [15–17] провел исследования влияния конструкции замка на поршневое уплотнение двигателя внутреннего сгорания. Также Эйвас установил, что увеличивать число поршневых колец более трех не имеет смысла, так как утечки газа уменьшаются совсем незначительно. Поршневое кольцо с герметичным замком препятствует утечкам, так же как и три поршневых кольца с прямыми замками. В то же время давление газов за герметичным кольцом не уменьшается до нуля, что свидетельствует об утечках и через такое кольцо.

Детандеры высокого давления уплотняют двойными поршневыми кольцами из перлитного чугуна. Преимущества двойных колец — в более высокой герметичности в результате перекрытия замков поршневых колец и в меньшей длине поршневого уплотнения; длина сокращается из-за уменьшения числа проставочных колец и вследствие повышенной герметичности двойных колец. За рубежом поршневые уплотнения без смазки применяются в детандерах фирмы «Купер-Бессемер» (США). Такие детандеры позволяют снизить эксплуатационные расходы, повысить КПД установки и эксплуатационную безопасность, что способствует увеличению производства жидкого водорода и гелия. Уплотнительные и направляющие поршневые кольца выполнены из композиций политетрафторэтилена и скользят по гильзе цилиндра, покрытой слоем хрома. Утечка не превышает 0,5 %.

Известно технологическое решение по нанесению антифрикционного самосмазывающегося материала на поверхность поршневых колец, в которых предварительно сделаны кольцевые проточки. Недостатком данной конструкции является тот факт, что при износе поршневых колец антифрикционная вставка расшатывается и подвержена выпадению.

Для улучшения работоспособности цилиндрических поршневых колец на их рабочей поверхности протачиваются канавки, которые заполняются антифрикционными, самосмазывающимися либо полимерными материалами. Трудности использования таких колец заключаются в том, что при их износе вставки расшатываются в своих канавках либо полностью выпадают из них.

Применение манжетного уплотнения возможно в двух вариантах закрепления манжет: на поршне и в цилиндре детандера. Первый нашел применение в некоторых воздушных детандерах среднего давления, однако не получил широкого распространения, второй — в гелиевых низкотемпературных детан-

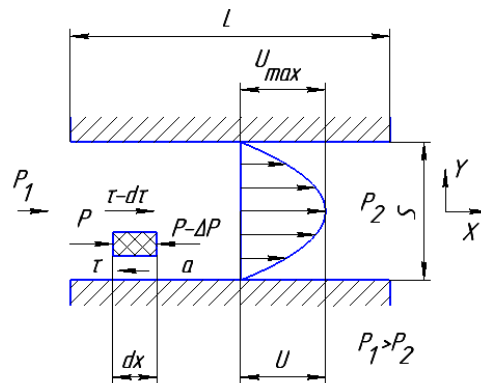


Рис. 1. Режим течения вязкой жидкости
Fig. 1. Viscous liquid flow mode

дерах. В качестве материала манжет используется, как правило, кожа типа «хромовый чепрак». Для гелиевых же детандеров низкий уровень рабочих температур приводит к тому, что потеря эластичности и рост жесткости манжеты не позволяют обеспечить требуемых характеристик манжетного уплотнения (малая утечка и малая работа трения).

Математическая модель рабочих процессов тихоходной длинноходовой ступени довольно широко и подробно описана в работах [15], однако учет подвижности стенок, образующих радиальную щель в цилиндропоршневом уплотнении, не был исследован.

Основной целью данного исследования является: определить качественное отличие течения рабочей среды в радиальной щели цилиндропоршневого уплотнения в стационарной постановке и при учете подвижности одной из стенок.

При решении поставленной задачи были приняты следующие допущения:

- 1) образованная щель состоит из параллельных стенок и работает без масла;
- 2) течение рабочей среды — стационарное, ламинарное, без теплообмена;
- 3) зазор щели одинаков по всему протяжению цилиндра и не меняется от давления.

Теория

Рассмотрим типовую схему течения вязкой жидкости между двумя параллельными пластинами по действию перепада давления $\Delta P = P_1 - P_2$ (рис. 1). Высота зазора между двумя параллельными пластинами составляет s . Считаем, что поток двумерный и что распределение скоростей в сечении носит параболический характер.

Выделим некую элементарную частицу a жидкости, которая находится вблизи нижней пластины, и составим для нее условия равновесия сил:

$$dp dy - (\tau - d\tau) dx = \tau dx. \quad (1)$$

Принимаем во внимание, что

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \text{ и } \frac{d\tau}{dy} = \mu \frac{d^2u}{dy^2}.$$

Можно записать

$$\frac{dP}{dx} = \mu \frac{d^2u}{dy^2}. \quad (2)$$

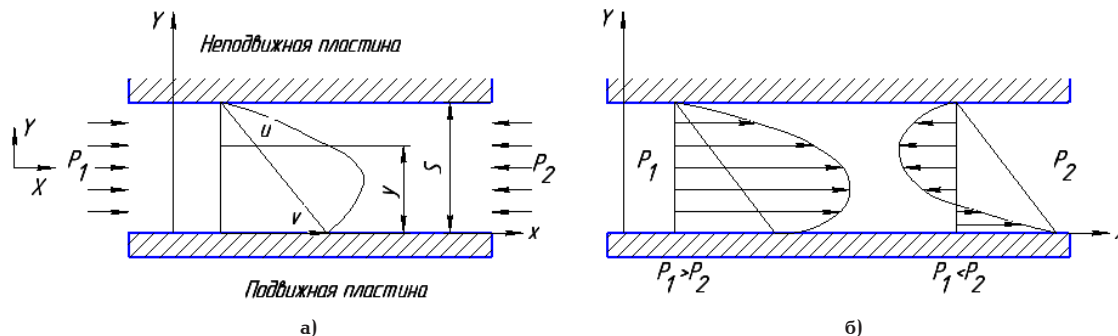


Рис. 2. Режим течения вязкой жидкости с учетом подвижности стенок
Fig. 2. The flow regime of a viscous liquid taking into account the mobility of the walls

Проинтегрируем выражение (2) дважды по y , получим скорость потока жидкости u :

$$u = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{dP}{dx} \cdot \frac{y^2}{2} + C_1 y + C_2.$$

В свою очередь, C_1 и C_2 определяются из условия равенства нулю скоростей, при $y = \pm s/2$ значение $C_1 = 0$, а значение $C_2 = -\frac{1}{\mu} \cdot \frac{dP}{dx} \cdot \frac{s^2}{8}$, откуда получаем уравнение для нахождения скорости потока жидкости:

$$u = -\frac{1}{2\mu} \cdot \left(\frac{s^2}{4} - y^2 \right) \frac{dP}{dx}. \quad (3)$$

Для ширины щели w в плоскости, перпендикулярной к потоку, расход при ламинарном течении будет равен:

$$Q = \frac{(P_1 - P_2)s^2\omega}{12\mu L}. \quad (4)$$

Перепад давления, в свою очередь,

$$\Delta P = \frac{12\nu y L Q}{g s \omega^3}, \quad (5)$$

где $\frac{(P_1 - P_2)}{L}$ — градиент давления по длине щели в направлении движении потока;

μ, ν — динамическая и кинематическая вязкость протекающей среды;

y, g — объемный вес рабочей среды и ускорение силы тяжести.

Для компрессорной техники наиболее характерным является течение рабочей среды под действием перепада давления $\Delta P = P_1 - P_2$ между двумя поверхностями, одна поверхность из которых неподвижная, а вторая перемещается со скоростью v , равной скорости скольжения поршня (рис. 2а, б). На рис. 2б представлен профиль скорости рабочей среды в зависимости от вектора перепада давления.

Величина массовых утечек в данном случае (с учетом подвижности одной из стенок) можно определить по следующей формуле:

$$Q = \omega \left(\frac{\Delta P s^3}{12\mu L} \pm \frac{vs}{2} \right). \quad (6)$$

Для дальнейшего удобства проведения расчета произведем замену общих символов на символы,

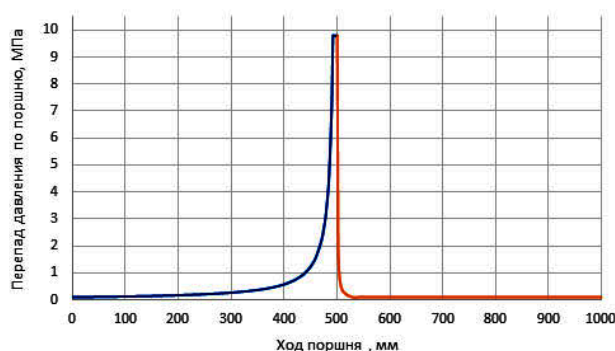


Рис. 3. Перепад давления по поршню в зависимости от хода поршня
Fig. 3. Pressure drop across the piston depending on the stroke of the piston

принятые в компрессоростроении, получим следующее выражение:

$$Q = \pi \delta \left(\frac{\Delta P \delta^3}{12\mu L} \pm \frac{C_n \delta}{2} \right), \quad (7)$$

где ΔP — разница давления до поршня и после;

δ — радиальный зазор в цилиндропоршневом уплотнении;

C_n — скорость поршня;

L — осевой размер поршня.

Знаки «+» и «-» в выражении (7) обусловлены следующими вариантами: вектор движения подвижной стенки (поршня) совпадает с вектором действия перепада давления, поршень движется из верхней мертвой точки (ВМТ) к нижней мертвой точке (НМТ); вектор движения подвижной стенки (поршня) поменял свое направление и не совпадает с вектором действия перепада давления, поршень движется из НМТ к ВМТ.

Объект исследования

Объектом исследования в данной работе является цилиндропоршневое уплотнение тихоходной длинноходовой ступени [10], работающей при следующих параметрах: давление всасывания — 0,1 МПа, давление нагнетания — 10 МПа, ход поршня — 0,5 м, время цикла — 2 с, диаметр цилиндра — 0,05 м, сжимаемый газ — воздух.

Параметры цилиндропоршневого уплотнения: число уплотнительных манжет — 6 шт., осевой размер поршня — 0,055 м, радиальный зазор в уплотнении — 1 мкм.

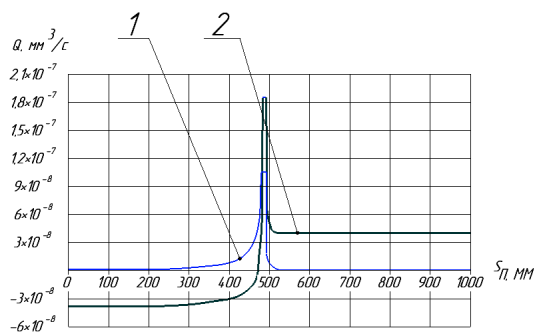


Рис. 4. Объемный расход сжимаемого газа:

1 — без учета подвижности стенок;

2 — с учетом подвижности стенок

Fig. 4. Volume flow rate of the compressed gas:

1 — without considering the mobility of the walls;

2 — considering the mobility of the walls

Результаты и обсуждение

Используя разработанную математическую модель [17], была получена диаграмма перепада давления по поршню в зависимости от хода поршня (рис. 3).

Используя полученные данные по перепаду давления за время цикла, определили объемный расход сжимаемого газа без учета подвижности стенки и с учетом подвижности стенки (поршня), полученные результаты представлены на рис. 4. Как видно из рис. 4, при учете подвижности стенки утечки сжимаемой среды через неплотности в цилиндропоршневом уплотнении увеличиваются в абсолютном выражении в среднем на 10 %. Описанная в данной работе методика расчета может быть использована для повышения точности расчета утечек в цилиндропоршневом уплотнении. Особенно актуален учет подвижности стенок при рассмотрении цилиндропоршневого зазора в высокооборотных компрессорах среднего и высокого давления.

Выводы

Проведённые исследования показали необходимость уточнения в моделях рабочих процессов тихоходных поршневых машин уравнений массового расхода через цилиндропоршневые уплотнения, то есть учитывать деформацию стенок цилиндра. Пренебрежение данным фактором может увеличить погрешность получаемых результатов на 10 % и более.

Список источников

- Захаренко В. П. Основы теории уплотнений и создание поршневых компрессоров без смазки: дисс. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 2001. 341 с.
- Архаров А. М., Буткевич К. С., Буткевич И. К. [и др.]. Криогенные поршневые детандеры. Москва: Машиностроение, 1974. 240 с.
- Новиков И. И., Захаренко В. П., Ландо Б. С. Бессмазочные поршневые уплотнения в компрессорах. Ленинград: Машиностроение, 1981. 238 с.
- РД 39-0148139-0001-2000. Система технического обслуживания и ремонта компрессорных станций на базе технической диагностики. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293731/4293731785.pdf> (дата обращения: 10.03.2023).
- Пластилин П. И. Поршневые компрессоры. В 2 т. Т. 1. Теория и расчет. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: КолосС, 2006. 456 с. ISBN 5-9532-0428-0.

6. Бусаров С. С., Бусаров И. С., Титов Т. С. Экспериментальное определение условных зазоров цилиндропоршневых уплотнений компрессорных агрегатов // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2019. Т. 3, № 1. С. 50–56. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-1-50-56. EDN: ZCCWGT.

7. Фотин Б. С., Пирумов И. Б., Прилуцкий И. К., Пластилин П. И. Поршневые компрессоры / под ред. Б. С. Фотина. Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. 372 с.

8. Захаренко А. В., Захаренко В. П. О расчете нагрузок в многокольцевом поршневом уплотнении компрессоров без смазки высокого давления // Вестник Международной академии холода. 2012. № 2. С. 29–32. EDN: PBSKNR.

9. Wirret C. E. Design of a closed-cycle helium temperature refrigerator // Advances in Cryogenic Engineering. 1966. Vol. 11. P. 107–116. DOI: 10.1007/978-1-4757-0522-5_12.

10. Френкель М. И. Поршневые компрессоры: теория, конструкции и основы проектирования. 3-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Машиностроение, 1969. 744 с.

11. Мирзоев Р. Г., Кугушев И. Д., Брагинский В. А. Основы конструирования и расчета деталей из пластмасс и технологической оснастки для их изготовления. Ленинград: Машиностроение, 1972. 416 с.

12. Robinson G. Y. Large-scale Low-temperature Refrigerators (to 2° K) for Nuclear Studies // Dechema-Monographien. 1968. No. 58, vol. 1027–1077.

13. Голубев А. И., Кондаков Л. А., Овандер В. Б. Уплотнения и уплотнительная техника: справ. Москва: Машиностроение, 1986. 464 с.

14. Краснов В. И., Жильцов А. М., Набержнев В. В. Ремонт центробежных и поршневых насосов нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий: справ. Москва: Химия, 1996. 317с. ISBN 5-7245-0959-8.

15. Hamilton J. Extensions of mathematical modeling of positive displacement type compressors. West Lafayette: Ray W. Herrick Laboratories of Purdue University, 1974. 136 p.

16. Пластилин П. И. Поршневые компрессоры. В 2 т. Т. 2. Основы проектирования. Конструкции. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: КолосС, 2008. 711 с.

17. Котлов А. А., Бураков А. В. Сравнительный анализ работы одноступенчатого поршневого компрессора, сжимающего различные газы // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2019. Т. 3, № 4. С. 26–35. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-4-26-35. EDN: PJTMMH.

НИКИФОРОВ Александр Георгиевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой механизации Смоленской государственной сельскохозяйственной академии, г. Смоленск. SPIN-код: 9236-5572

AuthorID (РИНЦ): 812960

Адрес для переписки: bssi1980@mail.ru

МУСЛОВА Любовь Анатольевна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры иностранных языков Санкт-Петербургского университета МВД, г. Санкт-Петербург.

Для цитирования

Никифоров А. Г., Муслова Л. А. Влияние подвижности стенки на массовый расход в тихоходной длинноходовой ступени // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 4. С. 9–14. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-9-14.

Статья поступила в редакцию 18.09.2023 г.

© А. Г. Никифоров, Л. А. Муслова

THE EFFECT OF WALL MOBILITY ON MASS FLOW IN A SLOW-MOVING LONG-STROKE STAGE

A. G. Nikiforov¹, L. A. Muslova²

¹ Smolensk State Agrarian Academy,
Russia, Smolensk, Bolshaya Sovetskaya St., 10/2, 214000

² St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs,
Russia, Saint Petersburg, Letchik Pilyutov St., 1, 198206

In modern models and calculation methods of existing high-speed reciprocating compressors, the mobility of the walls is not considered due to the insignificant value and insignificant effect on the efficiency of the working process. Low — speed piston machines currently being developed at Omsk State Technical University have a number of features — first of all, an elongated cylinder, subject to large deformations compared to existing analogues and a long compression time. Which naturally significantly affects the flow of the workflow. The conducted studies have shown that not considering the mobility of the walls can lead to significant errors obtained when modeling the working process of low-speed reciprocating compressors.

Keywords: reciprocating compressor, mass leaks, mathematical modeling, operating mode.

References

1. Zakharenko V. P. Osnovy teorii uplotneniy i sozdaniye porshnevnykh kompressorov bez smazki [Fundamentals of seal theory and the creation of lubrication-free reciprocating compressors]. Saint Petersburg, 2001. 159 p. (In Russ.).
2. Arkharov A. M., Butkevich K. S., Butkevich I. K. [et al.]. Kriogennyye porshnevyye detandery [Cryogenic piston expanders]. Moscow, 1974. 240 p. (In Russ.).
3. Novikov I. I., Zakharenko V. P., Lando B. S. Bessmazochnyye porshnevyye uplotneniya v kompressorakh [Lubricant-free piston seals in compressors]. Leningrad, 1981. 238 p. (In Russ.).
4. RD 39-0148139-0001-2000. Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta kompressornykh stantsiy na baze tekhnicheskoy diagnostiki [System for maintenance and repair of compressor stations based on technical diagnostics]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293731/4293731785.pdf> (accessed: 03.10.2023). (In Russ.).
5. Plastinin P. I. Porshnevyye kompressory. V 2 t. T. 1. Teoriya i raschet [Piston compressors. In 2 vols. Vol. 1. Theory and calculation]. 3rd ed. Moscow, 2006. 456 p. ISBN 5-9532-0428-0. (In Russ.).
6. Busarov S. S., Busarov I. S., Titov T. S. Eksperimental'noye opredeleniye usloynykh zazorov tsilindroporshnevnykh uplotneniy kompressornykh agregatov [Experimental determination of conditional clearances for cylinder piston seals of compressor units] // Omskiy Nauchnyy Vestnik. Ser. Aviatzionno-Raketnoye i Energeticheskoye Mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2019. Vol. 3, no. 1. P. 50—56. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-1-50-56. EDN: ZCCWGT. (In Russ.).
7. Fotin B. S., Pirumov I. B., Prilutskiy I. K., Plastinin P. I. Porshnevyye kompressory [Piston compressors] / ed. by B. S. Fotina. Leningrad, 1987. 372 p. (In Russ.).
8. Zakharenko A. V., Zakharenko V. P. O raschete nagruzok v mnogokol'tsevom porshnevom uplotnenii kompressorov bez smazki vysokogo davleniya [On the calculation of loads in a multi-ring piston seal of compressors without high-pressure lubrication] // Vestnik Mezhdunarodnoy Akademii Kholoda. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2012. No. 2. P. 29—32. EDN: PBSKNR. (In Russ.).
9. Wirret C. E. Design of a closed-cycle helium temperature refrigerator // *Advances in Cryogenic Engineering*. 1966. Vol. 11. P. 107—116. DOI: 10.1007/978-1-4757-0522-5_12. (In Engl.).
10. Frenkel M. I. Porshnevyye kompressory: Teoriya, konstruksii i osnovy proyektirovaniya [Piston compressors. Theory, designs and basics of design]. 3rd ed., revised and additional. Leningrad, 1969. 744 p. (In Russ.).
11. Mirzoyev R. G., Kugushev I. D., Braginskiy V. A. Osnovy konstruirovaniya i rascheta detaley iz plastmass i tekhnologicheskoy osnastki dlya ikh izgotovleniya [Fundamentals of design and calculation of plastic parts and technological equipment for their manufacture]. Leningrad, 1972. 416 p. (In Russ.).
12. Robinson G. Y. Large-scale Low-temperature Refrigerators (to 2° K) for Nuclear Studies // *Dechema-Monographien*. 1968. No. 58, vol. 1027—1077. (In Engl.).
13. Golubev A. I., Kondakov L. A., Ovander V. B. Uplotneniya i uplotnitel'naya tekhnika: sprav [Seals and sealing technology: handbook]. Moscow, 1986. 464 p. (In Russ.).
14. Krasnov V. I., Zhiltsov A. M., Naberzhnev V. V. Remont tsentrobezhnykh i porshnevnykh nasosov neftepererabatyvayushchikh i neftekhimicheskikh predpriyatiy: sprav [Repair of centrifugal and piston pumps of oil refining and petrochemical enterprises: handbook]. Moscow, 1996. 320 p. ISBN 5-7245-0959-8. (In Russ.).
15. Hamilton J. Extensions of mathematical modeling of positive displacement type compressors. West Lafayette: Ray W. Herrick Laboratories of Purdue University, 1974. 136 p. (In Engl.).
16. Plastinin P. I. Reciprocating compressors. In 2 vols. Vol. 2. Fundamentals of design. Constructions. 3rd ed. Moscow, 2008. 711 p. (In Russ.).
17. Kotlov A. A., Burakov A. V. Sravnitel'nyy analiz raboty odnostupenchatogo porshnevoogo kompressora, szhimayushchego razlichnyye gazy [Comparative analysis of single-stage reciprocating compressor compressing different gases] // Omskiy Nauchnyy Vestnik. Ser. Aviatzionno-Raketnoye i Energeticheskoye



Mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2019. Vol. 3, no. 4. P. 26–35. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-4-26-35. EDN: PJTTMH. (In Russ.).

NIKIFOROV Alexander Georgievich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Mechanization Department, Smolensk State Agrarian Academy, Smolensk.

SPIN-code: 9236-5572

AuthorID (RSCI): 812960

Correspondence address: bssi1980@mail.ru

MUSLOVA Lyubov Anatolyevna, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of Foreign

Languages Department, St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs, Saint Petersburg.

For citations

Nikiforov A. G., Muslova L. A. The effect of wall mobility on mass flow in a slow-moving long-stroke stage // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2023. Vol. 7, no. 4. P. 9–14. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-9-14.

Received September 18, 2023.

© A. G. Nikiforov, L. A. Muslova

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРА ПОДВИЖНОСТИ СТЕНОК ЩЕЛИ ПРИ РАСЧЁТЕ ВЕЛИЧИНЫ ПРОТЕЧЕК В РАБОЧЕЙ ЧАСТИ СПИРАЛЬНОГО КОМПРЕССОРА. ЧАСТЬ 2

В. А. Пронин, А. В. Кованов, В. А. Цветков, Е. Н. Михайлова, П. А. Белов

Университет ИТМО,
Россия, 191002, г. Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, д. 9

Протечки рабочего вещества в зазорах проточной части компрессора занимают большую долю его объемных потерь. От точности определения количественной составляющей зависит оптимальность расчетных и аппроксимированных характеристик. Соответственно адекватная и качественная математическая модель должна включать фактор нестационарности процесса протечек, с учетом подвижности спиральных элементов. Вместе с этим большую роль в характере протечек играют реальные свойства рабочей среды, характеризующиеся коэффициентом сжимаемости. Таким образом, в настоящей статье ставится задача создания математической модели адекватной действительному процессу сжатия и позволяющей оценить степень влияния подвижности стенок щели на протечки через них. Результат численных расчетов по предложенной методике имеет меньшую погрешность относительно экспериментальных данных, чем результат, полученный без учета подвижности стенок щели. Также он показал значительное влияние на расход протечек как разности давлений на краях щели, так и вязкостных свойств паромасляной смеси, значительный процент которой составляет масло.

Ключевые слова: спиральный компрессор, нестационарное течение в щелях, рабочий зазор, подвижность стенок щели, методика расчета протечек.

Введение

Спиральный холодильный компрессор в силу своей специфики функционирует при переменных внешних условиях, обуславливающих непостоянство давлений на всасывании и нагнетании, а также массового расхода рабочего вещества, что требует изменяемой производительности. Регулирование частоты вращения приводного вала компрессора — наиболее эффективный способ достижения необходимой производительности, но надо учитывать, что при таком способе может изменяться и количественная составляющая объемных потерь.

Используемое в спиральном компрессоре (СПК) масло, помимо смазывающих свойств, попадая в полость сжатия, способствует интенсифицировать процесс теплообмена и уплотнить зазоры между рабочими органами [1, 2]. От свойств масла, которое является вязкой несжимаемой жидкостью, будет зависеть и изменение характера протечек через щели спиральных элементов [3, 4]. Вопросы гидродинамики для течения сплошных сред в узких каналах и щелях хорошо освещены в фундаментальных работах [5–7]. Настоящая статья посвящена разработке математической модели, описывающей течение среды в щели с подвижной стенкой, с учётом влияния вязкостных свойств и сжимаемости среды.

Исходя из схожести термодинамики рабочих процессов спирального и винтового компрессоров, анализируя изложенной в работах [1, 2, 7], аналогично винтовому компрессору, коэффициент подачи для СПК можно записать:

$$\lambda = \lambda_{\text{пл}} \cdot \lambda_{\text{о}} \cdot \lambda_{\text{м}} \cdot \lambda_{\text{с}}, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{пл}}$ — учитывает протечки рабочего тела через зазоры в рабочих органах, их можно разделить на утечки в полость всасывания и на перетечки между ячейками сжатия. Доля этих утечек занимает часть объема парной полости всасывания и повышает температуру свежей порции рабочего вещества. Потери от подогрева рабочего тела на всасывании учитывается коэффициентом $\lambda_{\text{о}}$. Вследствие перетечек паромасляной смеси между ячейками происходит падение давления раствора, из него выделяются пары хладагента, их называют балластным рабочим веществом, которое занимает часть объема парной полости. Данное обстоятельство учитывается коэффициентом $\lambda_{\text{с}}$. Поступающее в полость сжатия масло, аналогично занимает часть объема парной полости коэффициент $\lambda_{\text{м}}$, снижая коэффициент подачи. Основным видом потерь в СПК, согласно [8–16], являются протечки рабочего тела. Причём в ряде этих работ отмечается преобладающая доля, порядка 75 % протечек через радиальные щели рабочих органов СПК. Таким образом, построение общих математических моделей СПК, основанных на дифференциальных уравнениях процессов с переменной массой и описанных в работах [17–19], должны включать методики расчёта вышеизложенных факторов, таких как массообмен, теплообмен, механическое взаимодействие элементов машины между собой и т.д. Математическое моделирование рабочих процессов в СПК описано в многочисленных работах, среди которых можно выделить [20–26], где модели включают рассмотрение как процессов сжатия, так и их динамику. Т.е. процесс протечек рассматривается совместно с динамическим поведением основных узлов машины. Уравнения представленной модели [20] решены

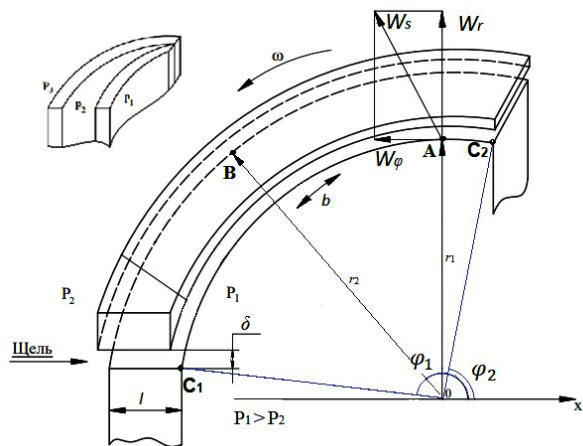


Рис. 1. Радиальная щель в полярной системе координат
Fig. 1. Radial slot in the polar coordinate system

с помощью метода Рунге – Кутты четвертого порядка, критерием сходимости которого является расхождение массового расхода и средней температуры рабочего вещества в области нагнетания за один оборот между итерациями. Но при этом расчёт параметров спирального компрессора в ряде работ [23–26] не учитывает изменения величин монтажных зазоров от тепловых и силовых деформаций. Данный вопрос рассматривается отдельно в работах [27, 28] на основе теорий механики упругости, теорий теплопередачи и CASE (Computer — Aided Software Engineering). Исследованиями установлено неравномерное распределение температуры, представлено распределение напряжений и деформаций. Методами CAE (Computer-aided engineering) были подобраны оптимальные размеры зазоров. В этих работах зазоры задавались в исходных данных постоянной величиной, не зависящей от угла поворота подвижной спирали (ПСП), что ставит вопрос точности такого подхода.

Поверхности, образующие зазоры между спиралями, движутся, поэтому представляет интерес оценка влияния этого движения на протечки через рабочие зазоры. Скорости движения названных поверхностей зависят как от их конфигурации, так и от исходных скоростных параметров. Конфигурация же зазоров определяется целым рядом факторов, все эти аспекты рассматривались нами ранее в первой части статьи. Так как при движении рабочих органов СПК изменяются параметры щелей и скорости взаимного движения поверхностей, их образующих, то и течение компримируемой среды через них нестационарное.

Учёт течения реального рабочего вещества в радиальной щели

Рассмотрим радиальную щель $C_1C_2 = b$ (ширина щели), представленную на рис. 1, на краях которой давления будут соответствовать значениям P_1 и P_2 , причём одна из поверхностей щели имеет угловую скорость ω . Оценим основные геометрические и кинематические характеристики для этой щели.

Течение среды в радиальном зазоре будем считать ламинарным, а характерную для зазора высоту δ — малой, по сравнению с его глубиной l . Также считаем малым комплекс $(\delta/l) \cdot Re$, где Re — характерное число Рейнольдса. Теплообменом потока рабочего вещества с ограничивающими его тверды-

ми поверхностями можно пренебречь. Кинематика потока, как было ранее показано, имеет напорно-фрикционный характер, а значит, в любой точке щели, например A (рис. 1), будет складываться из окружной и радиальной составляющих.

Угловая протяженность щели будет меняться с углом поворота вала:

$$b = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sqrt{\rho_2^2 + \rho_1^2} d\varphi = r_0 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sqrt{1 + \varphi^2} d\varphi = 0,5 r_0 \left[\varphi \sqrt{1 + \varphi^2} + \ln(\varphi + \sqrt{1 + \varphi^2}) \right]. \quad (2)$$

Для возможности описания течения паромасляной среды (смесь рабочего тела и масла), в конкретной щели нам необходимо воспользоваться соответствующими уравнениями газовой динамики, учитывая реальные свойства среды [10]. К основным уравнениям, описывающим движение сжимаемой среды в плоской щели, отнесём уравнение неразрывности, два уравнения движения и уравнение сохранения энергии, записанные для двухмерного потока.

Уравнение неразрывности для нестационарного течения сплошной среды в полярной системе координат имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(\rho W_r) + \frac{\partial}{\partial \varphi}(\rho W_\varphi) + \frac{\rho W_r}{r} = 0, \quad (3)$$

где ρ — плотность, t — время; W_r , W_φ — радиальная и окружная составляющие относительно скорости потока по отношению к выбранной спирали.

Дифференциальные уравнения движения сплошной среды в рассматриваемой системе координат будут содержать объёмные силы инерции и в общем виде могут быть записаны как:

$$\vec{F} = \omega^2 \vec{r}, \quad (4)$$

где $\vec{r}$ — радиус-вектор, проведенный из оси вращения вала ПСП в рассматриваемую точку, ω — вектор угловой скорости вала ПСП, относительно НСП. Тогда, исходя из рис. 1, с учётом выбранной полярной системы координат, можно записать:

$$F_r \approx \omega^2 r + 2\omega W_\varphi, \quad (5)$$

$$F_\varphi \approx -\omega^2 r - 2\omega W_r. \quad (6)$$

Дифференциальные уравнения ламинарного движения в соответствии с [29] можно записать в виде:

$$\frac{dW_r}{dt} + \frac{W_r^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial r} + \omega^2 r + 2\omega W_\varphi + \phi_r, \quad (7)$$

$$\frac{dW_\varphi}{dt} - \frac{W_r W_\varphi}{r} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial \varphi} - \omega^2 r - 2\omega W_r + \phi_\varphi, \quad (8)$$

где P — давление; ϕ_r , ϕ_φ — члены уравнения, характеризующие влияние вязкости и связанные с касательными напряжениями в потоке:

$$\left\{ \begin{aligned} \phi_r &= \frac{1}{\rho} \left[\left(\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{r\varphi}}{r \partial \varphi} + \frac{\tau_{rr} - \tau_{\varphi\varphi}}{r} \right) - \frac{2}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (\mu \cdot \text{div} \vec{W}) \right], \\ \phi_\varphi &= \frac{1}{\rho} \left[\left(\frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{\varphi\varphi}}{r \partial \varphi} + 2 \frac{\tau_{r\varphi}}{r} \right) - \frac{2}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} (\mu \cdot \text{div} \vec{W}) \right], \end{aligned} \right. \quad (9)$$

где μ — динамическая вязкость, τ_{rr} , $\tau_{r\varphi}$, $\tau_{\varphi\varphi}$ — касательные напряжения в потоке, а $\text{div}\vec{W}$ — дивергенция относительной скорости потока:

$\text{div}\vec{W} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rW_r) + \frac{\partial}{\partial \varphi} W_\varphi$, причем в случае ламинарного движения касательные напряжения выражаются через динамическую вязкость μ и компоненты тензора скорости деформации простыми зависимостями:

$$\tau_{rr} = 2\mu\dot{S}_{rr}; \tau_{r\varphi} = 2\mu\dot{S}_{r\varphi}; \tau_{\varphi\varphi} = 2\mu\dot{S}_{\varphi\varphi}. \quad (10)$$

Для компонент тензора скоростей деформации будут справедливы формулы:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{rr} &= \frac{\partial W_r}{\partial r}; \dot{S}_{r\varphi} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W_\varphi}{\partial r} - \frac{W_\varphi}{r} + \frac{\partial W_r}{r\partial\varphi} \right); \\ \dot{S}_{\varphi\varphi} &= \frac{\partial W_\varphi}{r\partial\varphi} + \frac{W_r}{r}. \end{aligned} \quad (11)$$

Уравнение энергетического баланса может быть записано в виде [30]:

$$\frac{di}{dt} = \frac{dP}{dt} + N_{\text{дис}} + \text{div}(\lambda' \cdot \text{grad}T), \quad (12)$$

где i — удельная энтальпия; T — температура; $N_{\text{дис}}$ — мощность сил трения, диссипируемая в теплоту; λ' — коэффициент теплопроводности.

$$N_{\text{дис}} = 4\mu \cdot \dot{S}_{r\varphi}^2 + \frac{2}{3} \mu \left[(\dot{S}_{rr} - \dot{S}_{\varphi\varphi})^2 + \dot{S}_{\varphi\varphi}^2 - \dot{S}_{rr}^2 \right], \quad (13)$$

а член, характеризующий теплопроводность:

$$\begin{aligned} \text{div}(\lambda' \text{grad}T) &= \\ &= \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda' \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{r\partial\varphi} \left(\lambda' \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\lambda'}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r}. \end{aligned} \quad (14)$$

Если воспользоваться уравнением неразрывности (3) и уравнениями движения (7) и (8), то уравнение (12) можно представить в ином, более удобном для дальнейшего рассмотрения виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r}(\rho i^* - P) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}(\rho r W_r i^*) + \frac{\partial}{r\partial\varphi}(\rho W_\varphi i^*) &= \\ = \rho W_r F_r + \rho W_\varphi F_\varphi + N_{\text{дис}} + \text{div}(\lambda' \text{grad}T), \end{aligned} \quad (15)$$

где i^* — полная удельная энтальпия:

$$i^* = i + \frac{1}{2}(W_r^2 + W_\varphi^2). \quad (16)$$

Для решения поставленной задачи к системе дифференциальных уравнений гидродинамики необходимо присоединить термическое и калорическое уравнения состояния сплошной среды, зависимости, характеризующие ее вязкость и теплопроводность, а также граничные и начальные условия.

Поставленная задача может решаться в два этапа. При движении рабочей среды, во время компримирования, масляная, более вязкая, фракция «запирает» щель, заполняя практически весь её объём. В данном исследовании для получения базовых расчетных зависимостей условно будем считать, что протечки состоят из жидкой фазы, т.е. масла, представляющую собой несжимаемую жидкость, вязкость которой зависит только от температуры T .

При этом полагая, что скорости течения масла не слишком велики, и пренебрегая теплообменом между потоками масла и ограничивающими щели поверхностями, будем считать, что динамическая вязкость μ в щели при любом орбитальном положении подвижной спирали, зависит от температуры в полости сжатия.

Учитывая сложность дифференциальных уравнений, их необходимо упростить за счет оценки порядка всех их членов с учетом течения в узких зазорах, которые имеют место в зацеплении рабочих органов СПК.

Ввод новых переменных и безразмерных величин, позволит соотнести критическое и докритическое течение среды, характеризуемое числом Маха. Также будем полагать, что величина зазора $\delta \ll r$, где r — радиус-вектор, время нахождения в зацеплении спиралей для рассматриваемой щели t_0 . В случае заполнения зазора несжимаемой жидкостью (маслом), уравнения упростятся. Далее если пренебречь нестационарным членом уравнения неразрывности, а затем вернуться обратно к его размерной форме, то получим упрощенное уравнение:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho W_r) + \frac{\partial}{\partial \varphi}(\rho W_\varphi) = 0. \quad (17)$$

В процессе приведения к безразмерному виду уравнения движения, компоненты тензора скоростей деформации и дивергенция относительной скорости так же следует выразить через безразмерные величины. Учитывая малую высоту щелей, течение масла будем считать ламинарным. В этом случае движение масла в радиальном зазоре между спиралами, после соответствующих преобразований, будет определяться системой упрощенных уравнений гидродинамики:

$$\frac{\partial W_r}{\partial x} + \frac{\partial W_\varphi}{r\partial\varphi} = 0, \quad (18)$$

$$\frac{\partial P}{r\partial\varphi} = \mu \frac{\partial^2 W_\varphi}{\partial x^2}, \quad (19)$$

где W_r , W_φ — составляющие скорости масла в относительном движении к НСП.

При выводе упрощенного уравнения энергетического баланса, для оценки членов аналогично переходим к безразмерным величинам, после решения уравнений и возвращения к размерной форме величин получим:

$$\frac{\partial(\rho W_r i^*)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho W_\varphi i^*)}{r\partial\varphi} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(W_\varphi \frac{\partial W_\varphi}{\partial x} \right) + \lambda' \frac{\partial T}{\partial x} \right], \quad (20)$$

Причём $i^* = i + 0,5W_\varphi^2$.

В случае течения несжимаемой жидкости $\rho = \rho_0$, кроме того, при небольших скоростях потока жидкости $i^* \approx cT$, где c — теплоемкость.

На данном этапе нами получены упрощенные уравнения для жидкой фазы (масла), которая представляет собой несжимаемую жидкость, движущуюся в щели. Динамическая вязкость масла μ при любом орбитальном положении подвижной спирали, зависит от температуры T в полости сжатия.

Для определения протечек жидкой фазы через радиальную щель проинтегрируем уравнение (28) сначала по x в пределах от 0 до h , а затем по φ

в пределах от φ' до φ'' . Тогда объемный расход масла через щель при данном положении спирали, определяемом углом θ , составит:

$$q = r \int_{\varphi'}^{\varphi''} \left(\int_0^h W_x dx \right) d\varphi. \quad (21)$$

Далее следует связать эту величину с градиентом давления $\frac{dP}{dx}$, при этом перепад давления ΔP между ячейками сжатия зависит от орбитального угла θ . Полный объём полости сжатия V может быть рассчитан по уравнению (22):

$$\bar{V}(\theta) = \frac{h}{2} \int_{\theta-2\pi}^{\theta} (r_1(\varphi)^2 - r_2(\varphi - \pi, \theta)^2) d\varphi, \quad (22)$$

где θ — угол поворота вала СПК; φ — полярный угол; r_1 — радиус вектор, проведенные из центра неподвижной спирали к образующей внутренней поверхности; r_2 — радиус-вектор, проведенные из центра подвижной спирали к образующей внешней поверхности.

А давление и температура в ячейках сжатия по уравнениям (23):

$$P_s(\theta) = P_0 \left(\frac{\bar{V}_0}{V(\theta)} \right)^k, \quad T_s(\theta) = T_0 \left(\frac{\bar{V}_0}{V(\theta)} \right)^{k-1}, \quad (23)$$

где V — объем рабочей полости при некотором текущем значении орбитального угла; P_s — текущее значение давления газа в рабочей полости; T_s — текущее значение температуры газа; V_0 — объем полости при окончании цикла всасывания; P_0 — давление всасывания; T_0 — температура рабочего тела на всасывании, а k — показатель адиабаты.

При экспоненциальной зависимости динамической вязкости от температуры она определится формулой:

$$\mu = \mu_0 e^{-a(T-T_0)}, \quad (24)$$

где a — термический коэффициент вязкости масла; μ_0 — динамическая вязкость масла при температуре T_0 .

Среднюю скорость масла в щели можно определить по формуле:

$$W_{\text{ср}} = \frac{H^2}{12\mu x'} \Delta P + \frac{\omega}{2} \left[(a - r \cos \theta) - 2r \frac{\sin \Delta\varphi/2}{\Delta\varphi} \right]. \quad (25)$$

Полная величина протечек жидкой фазы рабочего тела через радиальную щель между спиралями за рассматриваемое время, т.е. за время поворота ПСП на угол $(\theta_2 - \theta_1)$, определится выражением:

$$Q = \frac{1}{\omega} \int_{\theta_1}^{\theta_2} q d\theta. \quad (26)$$

Вывод упрощенных дифференциальных уравнений для течения в радиальном зазоре СПК позволяет получить расчётные зависимости для расхода рабочего тела через щели и, следовательно, определить коэффициент подачи компрессора.

Определение величины протечек и коэффициента подачи маслозаполненного СПК

Расчёты проведены для конкретной геометрии спирали и для конкретных условий работы. В ходе численного эксперимента получены значения протечек через радиальные щели в рабочей части СПК.

На базе полученной математической модели была разработана программа расчета протечек.

Вычисления для принятого типа спирали производятся в следующем порядке:

1. Устанавливается дискретность точек по орбитальному углу θ поворота ПСП и угловой координате φ на кромке спирали.
2. Осуществляется цикл интегрирования по θ , в ходе которого выполняются все перечисленные ниже вычисления.
3. На базе уравнения (22) определяется объем ячейки сжатия при фиксированном орбитальном угле θ .
4. С учётом уравнений (23) определяется перепад давления ΔP между полостями рассматриваемого участка спирали; плотность среды в полости сжатия — ρ и температура смеси — T :

$$\begin{cases} \Delta P = P_{\text{вс}} \left\{ [V(-\theta)/V(\theta - \pi)]^n - 1 \right\} \\ \rho = (\rho_{\text{вс}} + \xi_m \rho_m) V(-\theta)/V(\theta - \pi) \\ T = T_{\text{вс}} [V(-\theta)/V(\theta - \pi)]^{n-1} \end{cases} \quad (27)$$

В этих формулах: $P_{\text{вс}}$, $\rho_{\text{вс}}$, $T_{\text{вс}}$ — параметры рабочего тела на всасывании; $V(\theta)$ — полный объем полости сжатия; n — показатель политропы процесса сжатия в рабочей полости; ρ_m — плотность масла; ξ_m — концентрация масла в паромасляной смеси.

5. Осуществляется цикл интегрирования по φ , в ходе которого определяются геометрические

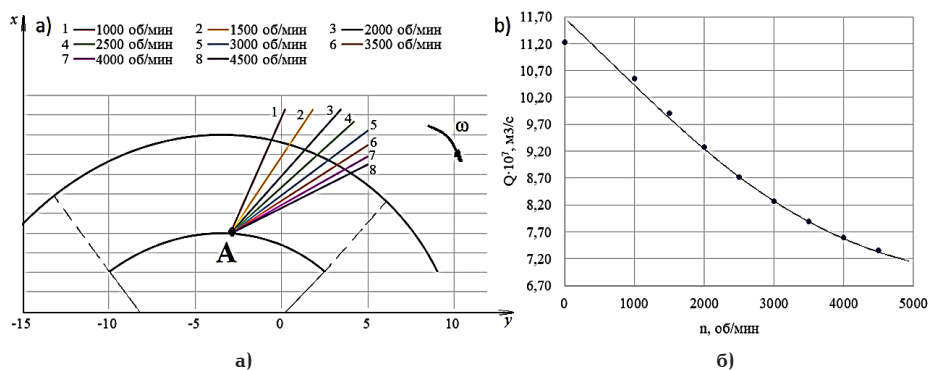


Рис. 2. Данные результаты расчёта в зависимости от скорости вращения вала: а) путь, пройденный рабочей средой; б) объём расхода протечек
Fig. 2. Calculation results according to the shaft speed: a) path passed by the medium; b) leakage flow rate

и кинематические характеристики щели. Расчеты ведутся в системе координат, связанной с точкой A на поверхности торца спирали, как показано далее на рис. 2а.

Ось Ау направлена по касательной к поверхности спирали; ось Ах направлена радиально, по радиусу, проведённому из центра ПСП. При расчете определяются проекции скорости ПСП относительно НСП: U_x , U_y , а также относительная скорость точки на поверхности ПСП: $U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2}$.

Изменение длины щели $b = \frac{U}{U_x} S$, глубина щели $l = \text{const}$ и высота щели $\delta = \text{const}$.

Значения W_0 , соответствующие одним и тем же значениям ΔP , при фиксированном угле θ и различных значениях φ определялись методом хорд, после чего подсчитывается удельный расход по дуге $d\varphi$:

$$q = r\delta\rho W_0. \quad (28)$$

В дальнейшем удельный расход суммировался по углу φ , а потом и по углу θ .

Составляющая коэффициента подачи СПК, соответствующая этим протечкам, определялась с помощью выражения:

$$\lambda_{\text{пл}} = \frac{1 - \int_{\theta_0}^{\theta_{\text{max}}} q(\theta, \varphi) d\varphi d\theta}{[\rho_{\text{вс}} V(-\theta_{\text{max}})]}. \quad (29)$$

Результаты и обсуждения

За исходные данные расчёта приняты параметры реального образца спирали, представленные ниже в табл. 1.

По исходным данным построена геометрия спиралей рис. 3. Геометрия рёбер спиралей показана на рис. 3а. Определены условные точки касания спиралей, соответствующие расчётному орбитальному углу подвижной спирали. Координата пересечения прямой с внешним ребром подвижной спи-

Таблица 1. Конструктивные параметры образца спирали
Table 1. Design parameters of the spiral sample

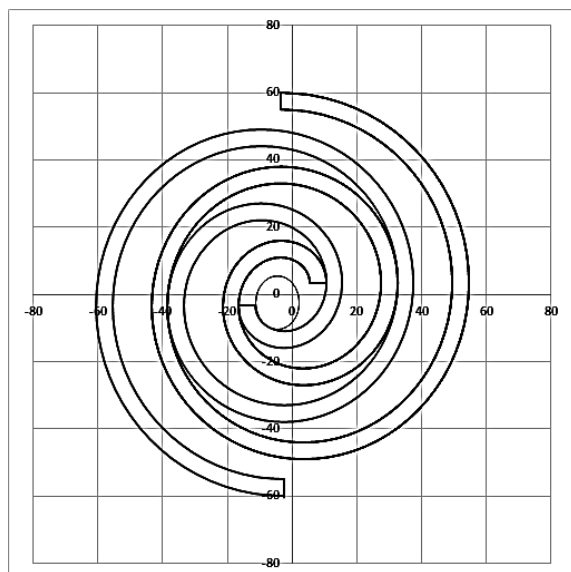
Наружный диаметр спирали D , мм	126
Эксцентриситет ε , мм	5,996
Радиус основной окружности r_0 , мм	3,5
Толщина ребра спирали l , мм	5
Высота радиального зазора δ , мм	$20 \cdot 10^{-6}$
Шаг спирали t , мм	21,991
Угол закрутки спирали θ_0 , рад	$6,54\pi$
Число витков спиралей	3
Геометрическая степень сжатия ε_r	1,42

рали представлена на рис. 3б, данные вычислены методом приближений.

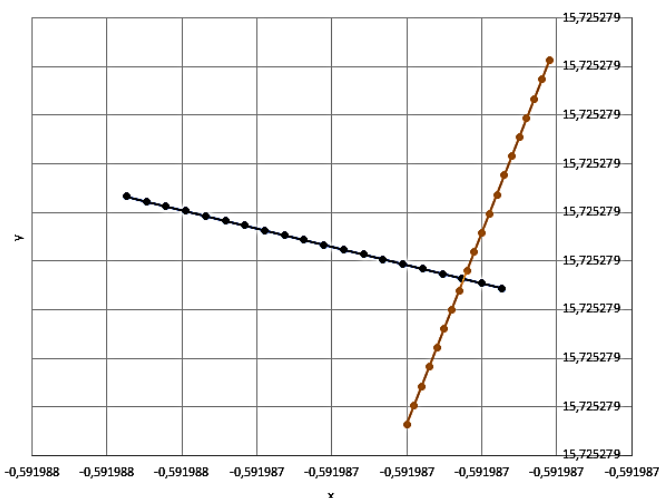
Расчёт расхода рабочего вещества проводился для НФС хладагентов, в исследовании представлены данные относительно R22 (табл. 2), т.к. характеристики СПК с этим хладагентом наиболее полно даны в открытых источниках, и не составляет труда обратиться к экспериментальным и расчётным данным. Для расчёта принят тип масла МО/АВ (табл. 3).

Расчёты проведены в диапазоне скорости вращения вала от 0 об/мин до 4500 об/мин, что выше номинальной скорости вращения при стандартной частоте 50 Гц, но вполне соответствует скорости вращения, получаемой с помощью частотного привода в диапазоне до 70 Гц. По результатам вычислений построена диаграмма пути, пройденного рабочим телом в щели в зависимости от частоты вращения вала компрессора (рис. 2а). Получена характеристика расхода рабочего тела в радиальной щели в зависимости от частоты вращения вала компрессора, которая представлена на рис. 2б.

Коэффициент подачи для экспериментального маслозаполненного спирального компрессора представлен на рис. 4, рассчитан по методике [30] через частные множители (1), применяемой в работах



а)



б)

Рис. 3. Построение спирали: а) геометрия рёбер спиралей на основе исходных данных;

б) к определению точки пересечения прямой и внешнего ребра спирали

Fig. 3. Construction of a spiral: a) geometry of spiral edges based on the initial data; b) to the definition of the intersection point of the line and the outer edge of the spiral

Таблица 2. Свойства R22 при $T = 423 \text{ К}$, $P = 0,8 \text{ МПа}$
Table 2. Properties of R22 at $T = 423 \text{ К}$, $P = 0,8 \text{ МПа}$

Свойство	Значение	Размерность
Показатель адиабаты	1,124	
Плотность	20,38	кг/м ³
Динамическая вязкость	$19,32 \cdot 10^{-6}$	Па·с

Таблица 3. Характеристики масла ХФ 22–24
Table 3. Characteristics of mineral oil

Вязкость кинематическая ν Ст (мм ² /с) при 100 °С	7
Плотность при 20 °С, г/см ³	0,883

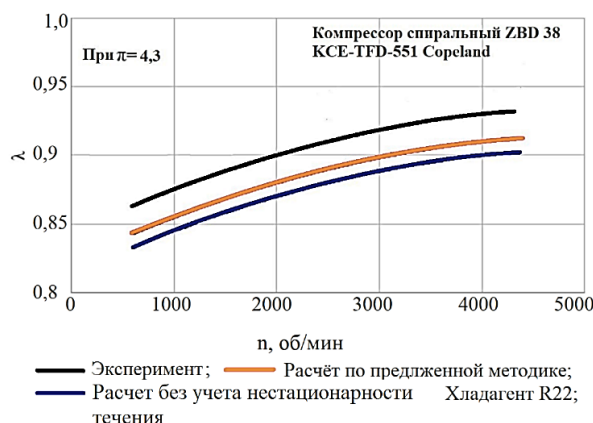


Рис. 4. Сравнительные характеристики зависимости коэффициента подачи СПК от частоты вращения вала
Fig. 4. Comparative characteristics of SCC feed coefficient dependence on the shaft speed

[10–12], и сопоставлен с вышеприведенными данными.

Сравнительный анализ показал отклонение расчётных данных коэффициента подачи выполненных по представленной методике около 4 %. Т.е. учет подвижности стенок позволяет более точно рассчитать протечки через щели в рабочей части СПК, а следовательно, и коэффициент подачи машины.

При значительных перепадах давления в щели, когда мы имеем критическое истечение, — объемный расход среды через щель будет зависеть от скорости звука в среде, которая, в свою очередь, зависит от объемной концентрации жидкой фазы в сжимаемой среде [5]. При этом, учитывая результаты расчёта и данные, полученные в работе [31, 32], численный эксперимент показывает: в случае, когда ΔP в щели малы, протечки паромасляной смеси по объёму в 4 раза меньше. Также следует предположить, что данное отношение, видимо, изменяется и зависит от свойств чистого вещества и состава паромасляной смеси.

Результаты численного эксперимента свидетельствуют также о том, что в щели должен происходить интенсивный отвод теплоты от паромасляной смеси, компенсирующий рост температуры вследствие вязкого трения и приближающий процесс к изотермическому.

Расчётные зависимости, составляющие методику, предполагают её универсальный характер в отношении используемых хладагентов и масел. В этом аспекте интерес вызывает её дальнейшая апробация

на диоксиде углерода, при появлении соответствующих экспериментальных данных работы СПК.

Выводы и заключение

— Разработана уточненная методика расчёта протечек рабочей среды в проточной части СПК;

— определен характер изменения объёмного расхода протечек рабочей среды в зависимости от числа оборотов вала СПК — зависимость имеет нелинейный характер и указывает на уменьшение расхода с увеличением числа оборотов. В то же время нормальная составляющая протечек зависит от ΔP , что в совокупности говорит о рациональности применения данной методики при определённых внешних условиях и режиме работы компрессора;

— получены результаты, позволяющие спрогнозировать объёмные и энергетические показатели компрессора, провести аппроксимацию характеристик с целью повышения эффективности холодильной машины.

В заключение следует отметить, что растущий запрос рынка на натуральные хладагенты, а также желание потребителя снизить стоимость владения оборудованием, требует от производителя снижения себестоимости и энергоёмкости новых компрессоров [33, 34]. Так, приведённые данные в этих источниках показывают целесообразность применения СПК для натуральных хладагентов, но вместе с этим прослеживается и масса практических задач, ориентированных на совершенствование компрессора:

- способы стабильного, и оптимального распределения подачи масла в условиях высокого перепада давлений;
- уравнивание конструкции, снижение шума и вибрации;
- разгрузка опорных и упорных подшипников;
- снижение температуры нагнетания и увеличение рабочей области компрессора;
- анализ силовых и тепловых деформаций рабочих органов компрессора;
- анализ снижения затрат на производство спиралей и поиск их оптимальной геометрии;
- выбор энергоэффективного способа регулирования производительности.

Приведенные аспекты являются наиболее вероятной темой дальнейших исследований.

Список источников

- Plaza E. L. Dynamic Analysis of a scroll compressor. Master of Science Thesis MMK 2007:33 MPK 593 KTH Industrial Engineering and Management Machine Design SE-100 44. Stockholm, Sweden, 2007. 80 p.
- Бежанишвили Э. М., Быков А. В., Гуревич Е. С. [и др.]. Холодильные компрессоры: справочник. Москва: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 279 с.
- Крестин Е. А. К вопросу о теоретическом исследовании гидродинамических характеристик течения вязкой несжимаемой жидкости в зазорах переменной высоты // Градостроительство и архитектура. 2018. Т. 8, № 1 (30). С. 130–134. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.01.22. EDN: XUATVR.
- Гурченков А. А. Неуставившееся движение вязкой жидкости между вращающимися параллельными стенками при наличии поперечного потока // Прикладная механика и теоретическая физика. 2001. Т. 42, № 4 (248). С. 48–51. EDN: ONVVMX.
- Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. Москва: Наука, 1987. 840 с.

6. Ден Г. Н. Введение в термогазодинамику реальных газов: курс лекций, прочитанный аспирантам СПГАХПТ. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГТУ, 1998. 139 с.
7. Бараненко А. В., Бухарин Н. Н., Пекарев В. И. [и др.]. Холодильные машины. Санкт-Петербург: Изд-во Политехника, 2006. 941 с.
8. Щерба В. Е., Дорофеев Е. А., Павлюченко Е. А. Оценка влияния нестационарности течения вязкой жидкости в цикле поршневой гибридной энергетической машины на величину массового расхода жидкости в щелевом уплотнении // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2021. № 10. С. 18–23.
9. Zheng S., Wei M., Song P. [et al.]. Thermodynamics and flow unsteadiness analysis of trans-critical CO₂ in a scroll compressor for mobile heat pump air-conditioning system // Applied Thermal Engineering. 2020. Vol. 175. P. 115368. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115368.
10. Zheng S., Wei M., Hu C. [et al.]. Flow characteristics of tangential leakage in a scroll compressor for automobile heat pump with CO₂ // Science China Technological Sciences. 2021. Vol. 64, № 5. P. 971–983. DOI: 10.1007/s11431-020-1765-3.
11. Pereira E. L. L., Braga V. M., Deschamps C. J. Data from the numerical analysis of radial and tangential leakage of gas in scroll compressors // Data in Brief. 2020. Vol. 29. P. 105197. DOI: 10.1016/j.dib.2020.105197.
12. Pereira E. L. L., Deschamps C. J. Numerical analysis and correlations for radial and tangential leakage of gas in scroll compressors // International Journal of Refrigeration. 2019. Vol. 110 (12). P. 239–247. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2019.11.002.
13. Suamir I. N. Study on the Performance of Scroll Compressor Applied for Medium Temperature Refrigeration System // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. 2021. Vol. 83, no. 2. P. 98–113. DOI: 10.37934/arfmts.83.2.98113.
14. Wang J., Liu T. Leakage model of axial clearance and test of scroll compressors // Journal of Shanghai Jiaotong University (Science). 2020. Vol. 25, № 4. P. 531–537. DOI: 10.1007/s12204-020-2163-6.
15. Hidaka A., Ikeda A., Morimoto T. [et al.]. Axial and Radial Force Control for a CO₂ Scroll Expander // HVAC&R Research. 2009. Vol. 15, № 4. P. 759–770. DOI: 10.1080/10789669.2009.10390862.
16. Hirofumi Y., Atsushi S., Yoshiyuki F. [et al.]. Clearance Control of Scroll Compressor for CO₂ Refrigerant // International Compressor Engineering Conference. 2008. 1848. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/1848/> (дата обращения: 14.01.2023).
17. Глаголев Н. М. Рабочие процессы двигателей внутреннего сгорания. Киев-Москва: Машгиз, 1950. 480 с.
18. Мамонтов М. А. Вопросы термодинамики тела переменной массы. Москва: Оборонгиз, 1961. 480 с.
19. Тарасов А. М., Егоров В. Г. Методика и расчет рабочего процесса винтовых компрессоров // Энергомашиностроение. 1970. № 6. С. 43–45.
20. Li G., Kim G. Performance Simulation of Scroll Compressors // International Conference on Compressors and Their Systems: 7th International Conference. 2001. P. 123–132.
21. Chen Y., Halm N., Groll E. [et al.]. Comprehensive Model of Scroll Compressor Part I: Compression Process Modeling // Proceedings of International Compressor Engineering Conference at Purdue. 2000. P. 715–724. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/4957156.pdf>. (дата обращения: 15.03.2023).
22. Chen Y., Halm N., Groll E. [et al.]. Comprehensive Model of Scroll Compressor Part II: Overall Scroll Compressor Modeling // Proceedings of International Compressor Engineering Conference at Purdue. 2000. P. 725–734. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2455&context=icec> (дата обращения: 15.03.2023).
23. Wang B., Li X., Shi W. A General Geometrical Model of Scroll Compressors Based on Discretional Initial Angles of Involute // International Journal of Refrigeration. 2005. Vol. 28, no. 6. P. 958–966. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2005.01.015.
24. Qiang J., Peng B., Liu Z. Dynamic Model for the Orbiting Scroll Based on the Pressures in Scroll Chambers – Part I: Analytical Modeling // International Journal of Refrigeration. 2013. Vol. 36, № 7. P. 1830–1849. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2013.02.004.
25. Qiang J., Peng B., Liu Z. Dynamic Model for the Orbiting Scroll Based on the Pressures in Scroll Chambers – Part II: Investigations on Scroll Compressors and Model Validation // International Journal of Refrigeration. 2013. Vol. 36, № 7. P. 1850–1865. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2013.02.013.
26. Winandy E., Lebrun J. Experimental Analysis and Simplified Modeling of a Hermetic Scroll Refrigeration Compressor // Applied Thermal Engineering. 2002. Vol. 22, № 2. P. 107–120. DOI: 10.1016/S1359-4311(01)00083-7.
27. Peng B., Honsheng Z., Li Z. [et al.]. Stress and Deformation Analyses of Twin-Spirals Scroll Plates Based on CAE // International Compressor Engineering Conference at Purdue, July 14–17. 2008. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2923&context=icec> (дата обращения: 15.03.2023).
28. Ullah H., Peng B., Bocko J. [et al.]. Stress and Deformation Analysis of Oil-Free Air Scroll Compressor // Journal of Physics: Conference Series. 2021. № 1877. P. 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/1877/1/012004.
29. Гиршфельдер Д. Ж. Молекулярная теория газов и жидкостей. Москва: Изд-во иностр. лит., 1961. 929 с.
30. Сакун И. А. Винтовые компрессоры: Основы теории, расчет, конструкция. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1970. 400 с.
31. Pronin V. A., Kuznetsov Y. L., Zhigovskaia D. V. [et al.]. Improving methodology calculating the leakages compressible environment in the working part of a screw compressor // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2141. P. 030010. DOI: 10.1063/1.5122060.
32. Пронин В. А., Верболоз А. Л. Оценка влияния подвижности стенок щелей на протечки компримируемой среды в винтовом однороторном компрессоре (ВКО) // Вестник Международной академии холода. 2012. Т. 42, № 1. С. 31–33. EDN: OWQHTL.
33. Emerson boost for CO₂ scroll technology. URL: <https://www.coolingpost.com/products/emerson-boost-for-co2-scroll-technology/> (дата обращения: 15.09.2022).
34. Emerson Aims to Increase R744 Adoption in Small Stores by Simplifying Systems. URL: <https://r744.com/emerson-aims-to-increase-r744-adoption-in-small-stores-by-simplifying-systems-dynamic-vapor-injection/> (дата обращения: 15.09.2022).

ПРОНИН Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, г. Санкт-Петербург.
SPIN-код: 3737-3495
AuthorID (РИНЦ): 706161
AuthorID (SCOPUS): 57188556577
ResearcherID: F-4743-2019
Адрес для переписки: maior.pronin@mail.ru
КОВАНОВ Александр Викторович, аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, г. Санкт-Петербург.
ORCID: 0000-0003-2821-795X
Адрес для переписки: avkovanov@itmo.ru



ЦВЕТКОВ Вадим Александрович, аспирант, ассистент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, г. Санкт-Петербург.

Адрес для переписки: wadimtsvetkov@mail.ru

МИХАЙЛОВА Екатерина Николаевна, аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, г. Санкт-Петербург.

Адрес для переписки: mikhaylova_en@mail.ru

БЕЛОВ Павел Андреевич, аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, г. Санкт-Петербург.

Адрес для переписки: mr.beloff99@gmail.com

Для цитирования

Пронин В. А., Кованов А. В., Цветков В. А., Михайлова Е. Н., Белов П. А. Оценка степени влияния фактора подвижности стенок щели при расчёте величины протечек в рабочей части спирального компрессора. Часть 2 // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 4. С. 15–24. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-15-24.

Статья поступила в редакцию 06.10.2023 г.

© В. А. Пронин, А. В. Кованов, В. А. Цветков,
Е. Н. Михайлова, П. А. Белов

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF GAP WALL MOBILITY FACTOR AT CALCULATION OF LEAKAGE IN WORKING SECTION OF A SCROLL COMPRESSOR. PART 2

V. A. Pronin, A. V. Kovanov, V. A. Tsvetkov, E. N. Mikhailova, P. A. Belov

ITMO University,
Russia, Saint Petersburg, Lomonosova str., 9, 191002

Leakage of the working substance in the compressor's flow gaps accounts for a large share of its volumetric losses. The optimality of calculated and approximated characteristics depends on the accuracy of quantitative component determination. Accordingly, an adequate and qualitative mathematical model should include the factor of non-stationarity of the leakage process, taking into account the mobility of scroll elements. At the same time, the real properties of the working medium, characterized by the compressibility coefficient, play an important role in the nature of leakage. Thus, in this article the task of creating a mathematical model adequate to the actual process of compression and allowing to estimate the degree of influence of the slit walls mobility on the leakage through them is set. The result of numerical calculations has a smaller error in relation to experimental data, and it also showed a significant influence on the leakage rate of both the pressure difference at the edges of the slot and the viscosity properties of the vapour-oil mixture, a significant percentage of which is oil.

Keywords: scroll compressor, unsteady flow in slots, working gap, mobility of slot walls, leakage calculation methodology.

References

1. Plaza E. L. Dynamic Analysis of a scroll compressor. Master of Science Thesis MMK 2007:33 MPK 593 KTH Industrial Engineering and Management Machine Design SE-100 44. Stockholm, Sweden, 2007. 80 p. (In Engl.).
2. Bezhanishvili E. M., Bykov A. V., Gurevich E. S. [et al.]. Kholodil'nyye kompressory [Refrigeration compressors: handbook]. Moscow, 1981. 279 p. (In Russ.).
3. Krestin E. A. K voprosu o teoreticheskom issledovanii gidrodinamicheskikh kharakteristik techeniya vyazkoy neszhimayemoy zhidkosti v zazorakh peremennoy vysoty [On the theoretical study of the hydrodynamic characteristics of viscous incompressible fluid flow in gaps of variable height] // Gradostroitel'stvo i Arkhitektura. *Urban Construction and Architecture*. 2018. Vol. 8, no. 1. P. 130–134. EDN: XUATVR. (In Russ.).
4. Gurchenkov A. A. Neustanovivsheyesya dvizheniye vyazkoy zhidkosti mezhdru vrashchayushchimisya parallel'nyimi stenkami pri nalichii poperechnogo potoka [Unsteady motion of a viscous liquid between rotating parallel walls in the presence of a crossflow] // Prikladnaya Mekhanika i Teoreticheskaya Fizika. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2001. Vol. 42, no. 4. P. 48–51. EDN: ONVVMX. (In Russ.).
5. Loytsyanskiy L. G. Mekhanika zhidkosti i gaza [Fluid and Gas Mechanics]. Moscow, 1987. 840 p. (In Russ.).
6. Den G. N. Vvedeniye v termogazodinamiku real'nykh gazov: kurs lektsiy prochitannyy aspirantom SPGAKHPT [Introduction to Thermogasodynamics of Real Gases. Course of lectures delivered to postgraduate students of SPSURFPT]. Saint Petersburg, 1998. 139 p. (In Russ.).
7. Baranenko A. V., Bukharin N. N., Pekarev V. I. [et al.]. Kholodil'nyye mashiny. [Refrigeration machines]. Saint Petersburg, 2006. 941 p. (In Russ.).
8. Shcherba V. E., Dorofeyev E. A., Pavlyuchenko E. A. Otsenka vliyaniya nestatsionarnosti techeniya vyazkoy zhidkosti v tsikle porshnevoy gibridnoy energeticheskoy mashiny na velichinu massovogo rashkoda zhidkosti v shchelevom uplotnenii [Evaluation of the influence of the viscous fluid flow unsteadiness in the cycle of a reciprocating hybrid power machine on the fluid flow rate in the slot seal] // Khimicheskoye i Neftegazovoye Mashinostroyeniye. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2021. No. 10. P. 18–23. (In Russ.).
9. Zheng S., Wei M., Song P. [et al.]. Thermodynamics and flow unsteadiness analysis of trans-critical CO₂ in a scroll compressor for mobile heat pump air-conditioning system // Applied Thermal Engineering. 2020. Vol. 175. P. 115368. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115368. (In Engl.).
10. Zheng S., Wei M., Hu C. [et al.]. Flow characteristics of tangential leakage in a scroll compressor for automobile heat pump with CO₂ // Science China Technological Sciences. 2021. Vol. 64, no. 5. P. 971–983. DOI: 10.1007/s11431-020-1765-3. (In Engl.).
11. Pereira E. L. L., Braga V. M., Deschamps C. J. Data from the numerical analysis of radial and tangential leakage of gas in scroll compressors // Data in Brief. 2020. Vol. 29. P. 105197. DOI: 10.1016/j.dib.2020.105197. (In Engl.).
12. Pereira E. L. L., Deschamps C. J. Numerical analysis and correlations for radial and tangential leakage of gas in scroll compressors // International Journal of Refrigeration. 2019. Vol. 110 (12). P. 239–247. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2019.11.002. (In Engl.).
13. Suamir I. N. Study on the Performance of Scroll Compressor Applied for Medium Temperature Refrigeration System // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. 2021. Vol. 83, no. 2. P. 98–113. DOI: 10.37934/arfmts.83.2.98113. (In Engl.).
14. Wang J., Liu T. Leakage model of axial clearance and test of scroll compressors // Journal of Shanghai Jiaotong University (Science). 2020. Vol. 25, no. 4. P. 531–537. DOI: 10.1007/s12204-020-2163-6. (In Engl.).
15. Hidaka A., Ikeda A., Morimoto T. [et al.]. Axial and Radial Force Control for a CO₂ Scroll Expander //

HVAC&R Research. 2009. Vol. 15, no. 4. P. 759–770. DOI: 10.1080/10789669.2009.10390862. (In Engl.).

16. Hirofumi Y., Atsushi S., Yoshiyuki F. [et al.]. Clearance Control of Scroll Compressor for CO₂ Refrigerant // International Compressor Engineering Conference. 2008. 1848. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/1848/> (accessed: 14.01.2023). (In Engl.).

17. Glagolev N. M. Rabochiye protsessy dvigateley vnutrennego sgoraniya. [Operating processes of internal combustion engines]. Kiev-Moscow, 1950. 480 p. (In Russ.).

18. Mamontov M. A. Voprosy termodinamiki tela peremennoy massy [Questions of thermodynamics of a body of variable mass]. Moscow, 1961. 480 p. (In Russ.).

19. Tarasov A. M., Egorov V. G. Metodika i raschet rabocheho protsessa vintovykh kompressorov [Methodology and calculation of the working process of screw compressors] // Energomashinostroyeniye. *Power Engineering*. 1970. No. 6. P. 43–45. (In Russ.).

20. Li G., Kim G. Performance Simulation of Scroll Compressors // International Conference on Compressors and Their Systems: 7th International Conference. 2001. P. 123–132. (In Engl.).

21. Chen Y., Halm N., Groll E. [et al.]. Comprehensive Model of Scroll Compressor Part I: Compression Process Modeling // Proceedings of International Compressor Engineering Conference at Purdue. 2000. P. 715–724. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/4957156.pdf>. (accessed: 15.03.2023). (In Engl.).

22. Chen Y., Halm N., Groll E. [et al.]. Comprehensive Model of Scroll Compressor Part II: Overall Scroll Compressor Modeling // Proceedings of International Compressor Engineering Conference at Purdue. 2000. P. 725–734. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2455&context=icec> (accessed: 15.03.2023). (In Engl.).

23. Wang B., Li X., Shi W. A General Geometrical Model of Scroll Compressors Based on Discretional Initial Angles of Involute // International Journal of Refrigeration. 2005. Vol. 28, no. 6. P. 958–966. DOI: 10.1016/j.jrefrig.2005.01.015. (In Engl.).

24. Qiang J., Peng B., Liu Z. Dynamic Model for the Orbiting Scroll Based on the Pressures in Scroll Chambers – Part I: Analytical Modeling // International Journal of Refrigeration. 2013. Vol. 36, no. 7. P. 1830–1849. DOI: 10.1016/j.jrefrig.2013.02.004. (In Engl.).

25. Qiang J., Peng B., Liu Z. Dynamic Model for the Orbiting Scroll Based on the Pressures in Scroll Chambers – Part II: Investigations on Scroll Compressors and Model Validation // International Journal of Refrigeration. 2013. Vol. 36, no. 7. P. 1850–1865. DOI: 10.1016/j.jrefrig.2013.02.013. (In Engl.).

26. Winandy E., Lebrun J. Experimental Analysis and Simplified Modeling of a Hermetic Scroll Refrigeration Compressor // Applied Thermal Engineering. 2002. Vol. 22, no. 2. P. 107–120. DOI: 10.1016/S1359-4311(01)00083-7. (In Engl.).

27. Peng B., Honsheng Z., Li Z. [et al.]. Stress and Deformation Analyses of Twin-Spirals Scroll Plates Based on CAE // International Compressor Engineering Conference at Purdue, July 14–17. 2008. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2923&context=icec> (accessed: 15.03.2023). (In Engl.).

28. Ullah H., Peng B., Bocko J. [et al.]. Stress and Deformation Analysis of Oil-Free Air Scroll Compressor // Journal of Physics: Conference Series. 2021. No. 1877. P. 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/1877/1/012004. (In Engl.).

29. Girshfel'der D. Zh. Molekulyarnaya teoriya gazov i zhidkostey [Molecular theory of gases and liquids]. Moscow, 1961. 929 p. (In Russ.).

30. Sakun I. A. Vintovyye kompressory: Osnovy teorii, raschet, konstruktsiya [Screw compressors: Fundamentals of theory, calculation, design]. Leningrad, 1970. 400 p. (In Russ.).

31. Pronin V. A., Kuznetsov Y. L., Zhigovskaia D. V. [et al.]. Improving methodology calculating the leakages compressible environment in the working part of a screw compressor // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2141. P. 030010. DOI: 10.1063/1.5122060. (In Engl.).

32. Pronin V. A., Verboloz A. L. Otsenka vliyaniya podvizhnosti stenok shcheley na protechki komprimiruyemoy sredy v vintovom odnorotornom kompressore (VKO) [Assessment of the effect of crevice wall mobility on compressed fluid leakage in a single-rotor screw compressor (SSC)] // Vestnik Mezhdunarodnoy Akademii Kholoda. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2012. Vol. 42, no. 1. P. 31–33. (In Russ.).

33. Emerson boost for CO₂ scroll technology. URL: <https://www.coolingpost.com/products/emerson-boost-for-co2-scroll-technology/> (accessed: 15.09.2022). (In Engl.).

34. Emerson Aims to Increase R744 Adoption in Small Stores by Simplifying Systems. URL: <https://r744.com/emerson-aims-to-increase-r744-adoption-in-small-stores-by-simplifying-systems-dynamic-vapor-injection/> (accessed: 15.09.2022). (In Engl.).

PRONIN Vladimir Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of Educational Centre «Energy Efficient Engineering Systems», ITMO University, Saint Petersburg.

SPIN-code: 3737-3495

AuthorID (RSCI): 706161

AuthorID (SCOPUS): 57188556577

ResearcherID: F-4743-2019

Correspondence address: maior.pronin@mail.ru

KOVANOV Alexander Victorovich, Graduate Student of Educational Centre «Energy Efficient Engineering Systems», ITMO University, Saint Petersburg.

ORCID: 0000-0003-2821-795X

Correspondence address: avkovanov@itmo.ru

TSVETKOV Vadim Aleksandrovich, Graduate Student, Assistant of Educational Centre «Energy Efficient Engineering Systems», ITMO University, Saint Petersburg.

Correspondence address: wadimtsvetkov@mail.ru

MIKHAILOVA Ekaterina Nikolaevna, Graduate Student of Educational Centre «Energy Efficient Engineering Systems», ITMO University, Saint Petersburg.

Correspondence address: mikhaylova_en@mail.ru

BELOV Pavel Andreevich, Graduate Student of Educational Centre «Energy Efficient Engineering Systems», ITMO University, Saint Petersburg

Correspondence address: mr.beloff99@gmail.com

For citations

Pronin V. A., Kovanov A. V., Tsvetkov V. A., Mikhailova E. N., Belov P. A. Assessment of the influence of gap wall mobility factor at calculation of leakage in working section of a scroll compressor. Part 2 // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2023. Vol. 7, no. 4. P. 15–24. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-15-24.

Received October 6, 2023.

© V. A. Pronin, A. V. Kovanov, V. A. Tsvetkov,

E. N. Mikhailova, P. A. Belov

О ВЗАИМОСВЯЗИ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМ КРУПНЫХ ХИМИЧЕСКИХ И НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ С ТЕХНИЧЕСКИМ ОБЛИКОМ ПАРКА КОМПРЕССОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В. Л. Юша, М. А. Сутягинский¹, А. Ю. Громов², П. В. Ушаков², Ю. А. Потапов¹

¹АО «Группа компаний «Титан»,
Россия, 644035, г. Омск, пр. Губкина, 22

²АО «Научно-технический комплекс «Криогенная техника»,
Россия, 644105, г. Омск, ул. 22 Партсъезда, 97, корп. 1

Рассмотрены вопросы, связанные с возможными проблемами реализации программ цифровизации крупных предприятий по переработке природного углеводородного и минерального сырья, обусловленными несоответствием технического уровня существующего парка компрессорного оборудования этих предприятий как требованиям современного производства, так и передовым достижениям в области компрессоростроения. Отмечено, что несоответствие между моделируемыми (виртуальными) и физическими технологическими объектами приводит к завышению расходов на создание и поддержку IT-продуктов, а также к снижению их эффективности. Предложены пути совершенствования элементной базы компрессорного оборудования. Выполнен теоретический анализ эффективности функционирования альтернативной конструкции ротационно-пластинчатого компрессора с подачей воды в его проточную часть, показывающий принципиальную возможность замены парка существующих поршневых технологических компрессоров на более совершенные конструкции, производство которых может быть полностью основано на отечественных технологиях и локализовано в РФ в интересах профильных отраслей перерабатывающей промышленности.

Ключевые слова: цифровизация, надежность, эксплуатационные характеристики, поршневые компрессоры, ротационно-пластинчатые компрессоры с впрыском воды, математическая модель.

Анализ проблем создания виртуальных аналогов технологического оборудования

Цифровые платформы как мотивационная база для развития современного технологического оборудования

Опережающее развитие IT-технологий и на их основе — создание цифровых платформ различных уровней, от локальных и корпоративных до государственных и межотраслевых — актуальный тренд индустриального развития РФ [1–6]. В то же время применительно к современным тенденциям в области глобальной цифровизации существует субъективное мнение, что формальный подход к реализации такого проекта может привести к невосполнимым потерям как в масштабах государства, так и в масштабах нашей цивилизации [7–8]. Применительно к промышленному производству, как основе развития современного общества и как основному источнику техногенных угроз его существованию, поспешная реализация предлагаемых программ цифровизации может привести к потере полноценной взаимосвязи между виртуальными технологическими объектами и их реальными физическими прототипами. Это может быть обусловлено объективным наличием неформализуемых или трудно формализуемых факторов, присущих большинству сложных технологических

объектов, например, ограниченными возможностями по глубине детализации виртуального объекта; непрогнозируемым изменением эксплуатационных параметров и характеристик реального объекта и др. Вполне очевидно, что необходимо стремиться к минимизации влияния таких факторов. Особенно актуально это для продукции отечественного производства. При этом возможны два основных подхода.

Первый подход связан с ориентацией на существующий парк технологического оборудования, с увеличением до непредсказуемого уровня сложности виртуальных объектов и систем управления ими, имея в виду необходимость учёта не только неоправданно высокой номенклатуры технологических объектов, их систем и узлов, но и вероятности значительного изменения эксплуатационных характеристик и параметров каждого из них; аварийного выхода из строя как локальных компонентов, так и систем; проблемы унификации, взаимозаменяемости и обеспеченности запасными частями и пр. Можно предположить, что такой IT-продукт потребует не только дополнительных систем защиты, но и постоянного «ручного» вмешательства: корректировки, доработки и контроля. В результате существенно возрастает трудоёмкость и стоимость создания и эксплуатации IT-продукта и цифровых платформ на его основе; неизбежно снижается его надёжность и, соответственно, безопасность реаль-

ного производства; повышается себестоимость товарной продукции (или, по меньшей мере, замедляется её снижение).

Другой подход может быть основан на плановой замене морально и физически устаревшего технологического оборудования на новую технику: более простую, надёжную, удобную в эксплуатации, адаптированную к цифровым технологиям. Применительно к задачам цифровизации такая концепция может не только повысить эффективность их реализации, но и перейти к такому принципу создания новой техники, при котором одними из требований технического задания будут требования, связанные с возможностью наиболее эффективной адаптации вновь создаваемого технического объекта к той или иной цифровой платформе. Другими словами, исходя из своих технико-экономических потребностей потребитель может более эффективно формировать парк требуемого технологического оборудования, участвуя в формулировании технических требований к перспективной технике, в том числе исходя из критериев соответствия программам цифровизации.

О соответствии парка существующих технологических компрессоров требованиям современного производства по переработке природного углеводородного и минерального сырья

В ряде машиностроительных отраслей такой подход успешно реализуется, например, в двигателестроении. Однако применительно к технологическому оборудованию малой и средней мощности масштаб задач в области цифровизации тех или иных производств существенно опережает технический уровень технологического оборудования этих производств. Основными типами технологического оборудования химических и нефтеперерабатывающих предприятий являются компрессоры, насосы, печи, теплообменники, реакторы и т.п. В качестве примера рассмотрим одни из наиболее сложных технических объектов — поршневые технологические компрессоры малой производительности с перепадом давления газа в ступени до 1,0...2,0 МПа, широко применяемые для сжатия водорода, водородсодержащего газа, азота и воздуха.

Прежде всего обращает на себя внимание широкая номенклатура компрессоров этой группы. На одном и том же предприятии можно одновременно увидеть поршневые компрессоры с близкими характеристиками таких фирм, как NEWMAN&ESSER, Worthington, LMF, Burckhardt, Howden SKD Compressors и др., а также Пензкомпрессормаш, «Борец», Сумское машиностроительное НПО имени М. В. Фрунзе [9–18].

При этом конструкция каждого из таких компрессоров может включать в себя до 500 наименований деталей и узлов, и это без учёта силового приводного агрегата, систем мониторинга, дополнительных систем (газовых коммуникаций, смазки, водяного и воздушного охлаждения). В самой простой конструкции двухрядного поршневого компрессора имеется не менее 10 узлов трения (подшипники, уплотнения), требующих постоянного мониторинга, обслуживания и ремонта. Не менее ответственными, тяжело нагруженными и проблемными узлами являются самодействующие клапаны. Износ этих узлов приводит к снижению КПД до 20 %, недопустимому повышению температуры нагнетания и увеличению утечек рабочего газа. В связи с этим межремонтные сроки для большинства техноло-

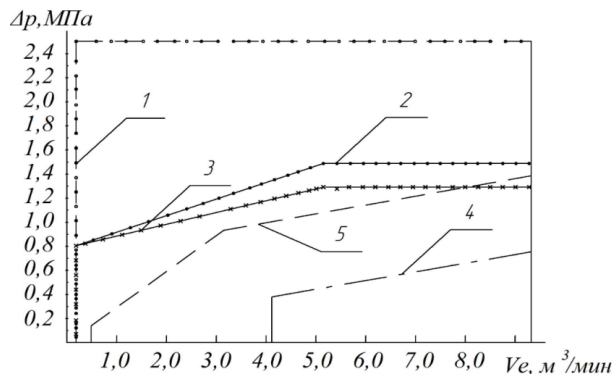


Рис. 1. Области применения основных типов компрессоров: 1 — поршневые компрессоры; 2 — винтовые компрессоры с подачей жидкости в рабочую камеру;

3 — роторно-пластинчатые компрессоры с подачей жидкости в рабочую камеру;

4 — центробежные компрессоры;

5 — перспективные центробежные компрессоры (прогноз)

Fig. 1. Scopes of the main types of compressors: 1 — piston compressors; 2 — screw compressors with liquid supply to the working chamber; 3 — rotary vane compressors with liquid supply to the working chamber; 4 — centrifugal compressors; 5 — promising centrifugal compressors (forecast)

гических поршневых компрессоров составляют не более 8000 часов; на практике эти величины могут быть значительно меньше [14, 16, 18].

Анализ альтернативных технических решений

Не претендуя в рамках данной статьи на какие-либо формулировки в конечной инстанции, необходимо отметить, что очевидными требованиями, предъявляемыми вновь разрабатываемыми цифровыми платформами к компрессорной технике, могут стать: максимальное снижение номенклатуры и предельная унификация, повышенная надёжность технических объектов, стабильность их характеристик в течение эксплуатационного периода, продолжительный межремонтный период.

В настоящее время основные усилия разработчиков и производителей поршневых технологических компрессоров рассматриваемого типа связаны с модернизацией узлов трения и газораспределения, что не решает принципиальных проблем, характерных для поршневых компрессоров, а зачастую приводит к дальнейшему удорожанию компрессоров в целом и их комплектующих в отдельности. При этом современный уровень техники позволяет ставить задачи по созданию альтернативных высококонкурентных компрессоров для рассматриваемого диапазона режимных параметров. На рис. 1 представлена диаграмма, полученная по результатам анализа многочисленных открытых источников информации и отражающая применимость различных типов компрессоров в диапазоне рассматриваемых рабочих параметров. На текущий момент доминирующее положение на рынке занимают поршневые компрессоры. Однако уже сейчас можно прогнозировать вполне реальную конкуренцию со стороны других типов компрессоров.

Так, например, анализ тенденций развития и постоянного повышения технического уровня турбокомпрессоров показывает, что ввиду своих известных преимуществ они постепенно расширяют диапазон режимных параметров в сторону снижения производительности, вытесняя с рынка другие типы компрессоров, в том числе и поршневые [19–22]. С учётом последних достижений в обла-

сти материаловедения, разработки подшипниковых узлов, конструирования проточной части ступеней с высокой степенью вероятности можно предполагать, что в обозримом будущем будут созданы центробежные компрессоры, обеспечивающие технологические режимы с производительностью от 1 до 10 м³/мин по условиям всасывания при перепаде давлений между нагнетанием и всасыванием от 0,4...0,6 МПа в одной ступени до 1,0...4,0 МПа при многоступенчатом сжатии.

С учётом того, что лучшие зарубежные образцы роторных компрессоров (например, винтовых с подачей масла или воды в проточную часть) уже сейчас обеспечивают режимные параметры, близкие к требуемым, более целесообразным представляется создание на базе отечественных технологий и в приемлемые сроки альтернативных конкурентоспособных конструкций роторно-пластинчатых компрессоров объёмного действия, также обладающих неоспоримыми преимуществами по сравнению с поршневыми компрессорами [23]. В связи с этим стоит отметить уже имеющийся в РФ положительный опыт реконструкции производств, когда в критических секторах экономики на государственном уровне в кратчайшие сроки были решены проблемы технологической безопасности в области создания собственного производства газовых турбин средней и большой мощности [24].

Цифровые платформы как дополнение к рыночному механизму развития компрессорной техники

Текущее состояние машиностроительных предприятий, производящих компрессорное оборудование малой мощности, не позволяет взять на себя разработку и организацию серийного производства перспективной техники. Маловероятно, чтобы государство смогло уделить должное внимание этой проблеме. Очевидной становится необходимость инициативы и участия наиболее крупных потребителей такого оборудования в формировании и реализации целевых программ по обновлению своего технологического, в том числе компрессорного оборудования. Упомянутые выше программы по созданию цифровых платформ могли бы стать эффективным инструментом для реализации требований потенциального потребителя к формированию технического облика перспективных компрессорных систем. При этом объём целевого финансирования инновационных разработок в рассматриваемой области компрессоростроения составит незначительную часть того объёма, который планируется на создание и реализацию цифровых технологических платформ [1–6].

Оценка перспективы создания альтернативных технологических компрессоров

В настоящей статье выполнена оценка возможности и целесообразности разработки и применения технологических ротационно-пластинчатых компрессоров в качестве одного из альтернативных вариантов замены существующих поршневых технологических компрессоров с указанным выше диапазоном паспортных режимных параметров.

Объект исследования

Как показал предварительный анализ, в ближайшей перспективе ротационно-пластинчатые компрессоры (РПК) могут стать одним из наиболее предпочтительных типов компрессорного оборудо-

вания малой мощности, обеспечивая технологическую безопасность и импортонезависимость РФ в целом ряде критически важных отраслей [23]. Для этого должны быть преодолены недоработки их конструкции, которые в настоящее время приводят к повышенным удельным энергозатратам и малому ресурсу.

Как показано в [23, 25], одними из основных критериев эффективности конструкций РПК являются их КПД, коэффициент подачи, мощность трения, удельный вес, ресурс, величины которых существенно зависят от быстроходности машин. Причем увеличение быстроходности положительно отражается на КПД, коэффициенте подачи и удельном весе, но негативно — на мощности трения и ресурсе. В РПК, как и в других типах роторных компрессоров, имеет место целая сеть зазоров в рабочей камере, определяющая наличие перетечек газа. Снижение интенсивности перетечек обеспечивается в том числе снижением времени процессов течения газа через зазоры, то есть увеличением быстроходности компрессора. Так, для обеспечения приемлемых КПД и коэффициента подачи для маслозаполненных винтовых компрессоров и РПК рекомендуемый диапазон окружных скоростей роторов составляет 30...50 м/с; при впрыске воды эта величина может составлять около 50...100 м/с в зависимости от количества впрыскиваемой жидкости и свойств рабочего газа; для роторных компрессоров «сухого» типа — 80...120 м/с [25–28].

Однако при таких скоростях величина мощности сухого трения пластин о зеркало цилиндра становится недопустимой; подача масла обеспечивает смазку в контакте пластина-цилиндр, однако повышенные затраты мощности на перемещение вязкой жидкости приводят к тому, что потери мощности в обоих этих случаях становятся соизмеримы; наибольший эффект обеспечивает впрыск воды, при котором суммарные потери мощности на трение на порядок меньше [29]. Очевидно, что при этом снижается и износ пластин.

С учётом изложенного выше в качестве объекта исследования рассмотрим воздушный РПК с подачей воды в рабочую камеру при окружных скоростях ротора в диапазоне 50...100 м/с, давлении всасывания 0,1 МПа, давлении нагнетания 0,4...0,8 МПа. При прямом соединении вала РПК с валом электродвигателя при $n_{об} = 3000$ об/мин диаметр цилиндра РПК необходим в диапазоне 0,3...0,8 м. Снижение механического трения до приемлемых величин при этом может быть дополнительно обеспечено применением ряда известных технических решений [23]; этот фактор далее в статье не рассматривается.

Математическая модель

Для теоретической оценки эффективности рабочего процесса воздушного РПК с подачей воды в рабочую камеру в рассматриваемом диапазоне конструктивных и режимных параметров применим математическую модель рабочего процесса компрессора объёмного действия со впрыском жидкости, подробно описанную в [25]. Применительно к РПК в качестве контрольного объёма рассмотрим рабочую ячейку переменного объёма, сформированную поверхностями корпуса, ротора и двух соседних пластин, которая заполнена гетерогенной смесью воздух–вода; внешний массообмен осуществляется через окна газораспределения и зазоры. Приняты следующие упрощающие допущения:

газовая среда непрерывна и подчиняется законам идеального газа; давление рабочего тела в полостях всасывания и нагнетания имеет постоянное значение; капельная жидкость представляет собой систему взвешенных в потоке капель сферической формы одинакового диаметра; течение рабочего газа через газораспределительные органы и конструктивные зазоры принимается адиабатным и квазистационарным; процессы межфазного массообмена в рабочих полостях квазистационарны; нагрев пленки жидкости происходит с постоянной температурой на поверхности и внутри слоя жидкости; на движение капель не влияет гидродинамическое взаимодействие между ними; воздействие на каплю силы Магнуса, гидромеханических, диффузионных и реактивных сил пренебрежимо мало; при взаимодействии с поверхностями корпуса жидкость осаждается в виде пленки, равномерно распределенной по поверхности; срыв пленки с поверхности рабочей камеры и коагуляция капель в газовом потоке отсутствуют; при дроблении частиц жидкости вращающимися поверхностями роторов размер вторичных частиц полностью определяется величиной скорости столкновения жидкости и ротора.

Система основных расчётных уравнений включает в себя первый закон термодинамики для тела переменной массы с учётом внешнего и межфазного массообмена, законы сохранения массы, Джоуля, Ньютона–Рихмана, Фурье, уравнения состояния, смешения, Фресслинга, Стокса, Сен-Венана–Ванцеля, Мещерского, эмпирические соотношения для определения коэффициентов теплоотдачи, расхода газа и других, и упрощённо может быть представлена в следующем виде [25]:

$$dU = dQ - dL + i_{np} dM_{np} + i_o dM_o + i_{фnp} dM_{фnp} - i_{фо} dM_{фо}; \quad (1)$$

$$dQ = [\alpha_k(T_{повк} - T)F_k N_k + \alpha_{на}(T_{на} - T)F_{на} + \alpha_{пл}(T_{пл} - T)F_{пл}]d\tau; \quad (2)$$

$$U_{n+1} = U_n + dU; \quad (3)$$

$$M_{n+1} = M_n + dM_{np} - dM_o + dM_{фnp} - dM_{фо}; \quad (4)$$

$$T = (U - dM_{фo})/(MC_V); \quad (5)$$

$$P = MRT/V; \quad (6)$$

$$M_{жп+1} = M_{жп} - dM_{фnp} + dM_{фо} - dM_{жо} + dM_{жпр}. \quad (7)$$

Представленная методика расчёта рабочего процесса РПК с подачей воды в его проточную часть позволяет выполнить теоретическую оценку его основных интегральных характеристик — коэффициента подачи, индикаторного КПД, температуры нагнетания. С учётом того, что данная методика была верифицирована лишь по отношению к винтовому компрессору (ВК) со впрыском воды [25], а также с учётом полного соответствия физических процессов в рабочих камерах ВК и РПК, можно рассматривать приведённые ниже результаты расчётов как достоверные с точки зрения прогнозных оценок эффективности компрессоров такого типа.

Результаты расчёта и их анализ

Основные результаты расчётов РПК с подачей воды в рабочую камеру представлены на рис. 2, 3.

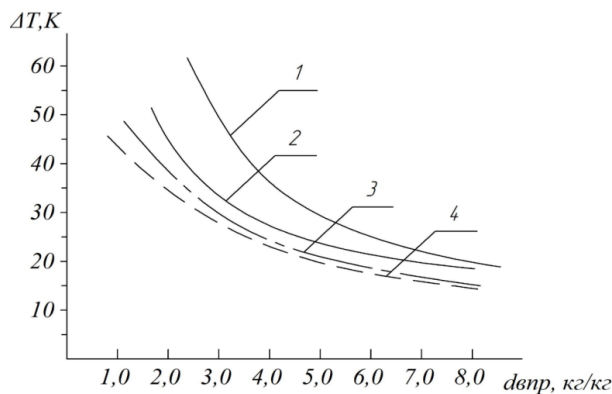


Рис. 2. Влияние режима работы РПК на величину температуры нагнетаемого газа: давление всасывания 0,1 МПа; 1, 2 — давление нагнетания 0,8 МПа; 3, 4 — давление нагнетания 0,5 МПа; 1, 3 — $U = 30$ м/с; 2, 4 — $U = 50$ м/с

Fig. 2. Influence of the operating mode of the RVC on the temperature of the discharged gas: suction pressure 0,1 MPa; 1, 2 — discharge pressure 0,8 MPa; 3, 4 — discharge pressure 0,5 MPa; 1, 3 — $U = 30$ m/s; 2, 4 — $U = 50$ m/s

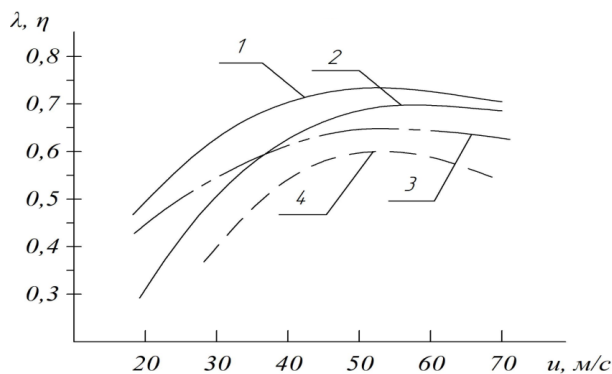


Рис. 3. Влияние режима работы РПК на величину коэффициента подачи (1,2) и на индикаторный изотермический КПД (3,4): давление всасывания 0,1 МПа; давление нагнетания 0,6 МПа; 1, 3 — $d_{впр} = 9$ кг/кг; 2, 4 — $d_{впр} = 3$ кг/кг

Fig. 3. Influence of the operating mode of the RVC on the value of the supply coefficient (1, 2) and on the indicator isothermal efficiency (3, 4): suction pressure 0,1 MPa; discharge pressure 0,6 MPa; 1, 3 — $d_{впр} = 9$ kg/kg; 2, 4 — $d_{впр} = 3$ kg/kg

Анализ температурного режима таких машин показал (рис. 2), что в рассмотренном диапазоне рабочих параметров, в том числе при повышении давления газа в одной ступени от 0,1 МПа до 0,8 МПа, гарантированно обеспечивается допустимый уровень температуры нагнетания, в том числе отвечающий требованиям опасных производств [30, 31], то есть не более 408 К (135 °C). Также выявлено, что при относительном количестве впрыскиваемой воды более 5,0 кг воды на 1,0 кг газа температура нагнетания не превышает 373 К (100 °C).

Результаты, представленные на рис. 3, показывают, что при окружной скорости периферийных участков пластин 40...60 м/с можно ожидать вполне удовлетворительных показателей эффективности рабочего процесса. На практике, при использовании прямого привода от электродвигателя с числом оборотов ротора 3000 об/мин, диаметр цилиндра РПК может составить около 0,4 м.

Как уже было показано выше, соответствующие проблемы снижения внутренних перетечек газа, а также потерь мощности на трение и износ пластин, связанных с высокими окружными скоростями, могут быть успешно решены с учётом существующих и прогнозных инновационных решений [23].

Выводы и заключение

Представленные результаты обзорно-аналитического и расчётно-теоретического анализа позволяют прогнозировать появление нового технического требования к вновь разрабатываемой компрессорной технике, связанного с интенсивным внедрением цифровых платформ, в том числе технологических, обеспечивающих надёжность и эффективность функционирования крупных производственных комплексов. При этом программы по созданию цифровых платформ могли бы стать эффективным инструментом для реализации требований потенциального потребителя к формированию технического облика перспективных компрессорных систем.

Средства, вложенные в программу непрерывного технического перевооружения технологического оборудования, позволяют не только снизить затраты на разработку IT-продуктов и цифровых платформ, на их последующую адаптацию, модернизацию, эксплуатацию и тиражирование, но и повысить надёжность и безопасность сложных технологических комплексов как за счёт повышения степени соответствия виртуальных и физических объектов, так и путем улучшения номинальных (паспортных) характеристик этого оборудования.

На примере компрессорной техники показано, что существующий парк технологических машин для сжатия газов не только не удовлетворяет требованиям современного производства, но и не соответствует заявляемым параметрам создаваемых цифровых платформ, необходимым для обеспечения эффективности их функционирования применительно к компрессорным системам. Одним из очевидных направлений решения этой проблемы является замена поршневых компрессоров на центробежные и роторные, в том числе замена поршневых компрессоров для сжатия водородсодержащих газов на более простые и надёжные аналоги, например, на ротационно-пластинчатые компрессоры с подачей в проточную часть воды или других технологических жидкостей.

Список источников

1. Шесть ключевых задач в экономике России на 2023 год. Стенограмма выступления Владимира Путина на заседании Совета по стратегическому развитию и национальным проектам. URL: <https://rg.ru/2022/12/15/stenogramma> (дата обращения: 16.12.2022).
2. ЦИПР 2023: Основные поручения Михаила Мишустина. URL: <https://www.content-review.com/articles/60029/> (дата обращения: 02.06.2023).
3. Герман Греф назвал пять технологий для достижения первенства в мире. URL: <https://www.vedomosti.ru/finance/articles/2023/04/12/970619-gref-opisal-osnovi-dlya-tehnologicheskogo-proriva-rossii> (дата обращения: 20.05.2023).
4. «Газпром нефть» и компания «Цифра» создали российскую цифровую платформу для управления производством. URL: <https://www.itweek.ru/iot/news-company/detail.php?ID=222937> (дата обращения: 24.02.2023).

5. Третьяков Н. А., Череповицын А. Е. Цифровая трансформация арктического нефтегазового комплекса: новые вызовы и возможности // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2022. № 1. С. 17–32. EDN: CMPQGG. DOI: 10.37614/2220-802X.1.2022.75.002.
6. Эффективное производство 4.0 (машиностроение и металлообработка): практ. пром. конф. URL: <https://oee-conf.ru/materials> (дата обращения: 24.02.2023).
7. Маск считает, что развитие ИИ может грозить уничтожением человечества. URL: <https://news.mail.ru/society/55871015/> (дата обращения: 18.04.2023).
8. Делягин М. Г. Информационные технологии против разума: постановка проблемы. URL: <https://delyagin.ru/articles/183-sobytiya/109652-informatsionnye-tehnologii-protiv-razuma-postanovka-problemy> (дата обращения: 28.05.2023).
9. ГОСТ Р 53737-2009 (ИСО 13707:2000). Нефтяная и газовая промышленность. Поршневые компрессоры. Общие технические требования. Введ. 2011–01–01. Москва: Стандартинформ, 2012. 156 с.
10. Общие технические условия по ремонту поршневых компрессоров. Волгоград: Миннефтехиммаш СССР, 1985. 363 с.
11. Пластинин П. И. Поршневые компрессоры. В 2 т. Т. 2. Основы проектирования. Конструкции. Москва: КолосС, 2008. 711 с.
12. Видякин Ю. А., Добровольский Е. Б., Кондратьева Т. Ф. Оппозитные компрессоры. Ленинград: Машиностроение, 1979. 279 с.
13. РД 39-0148139-0001-2000. Система технического обслуживания и ремонта компрессорных станций на базе технической диагностики. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200082157> (дата обращения: 06.03.2023).
14. Байков И. Р., Китаев С. В., Файрушин Ш. З. Диагностирование технического состояния поршневых компрессоров // Энергобезопасность и энергосбережение. 2015. № 3 (63). С. 28–30.
15. Фуладиванда М., Хейдари М. А. Исследование влияния хлорид-ионов на подпиточные водородные компрессоры = Fouladivanda M., Heidary M. A. A study into the impact of chloride ions on the make-up hydrogen compressors / пер. с англ. М. А. Федоровой // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 1. С. 75–84. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-1-75-84.
16. Захаренко А. В., Захаренко В. П. О расчёте нагрузок в многокольцевом поршневом уплотнении компрессоров без смазки высокого давления // Вестник Международной академии холода. 2012. № 2. С. 29–32.
17. Бусаров С. С., Беликов А. В., Капелюховский А. А., Капелюховская А. А. Анализ конкурентоспособности водородсодержащих циркуляционных компрессоров на базе тихоходных длинноходовых ступеней // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. Вып. 1. С. 499–503. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-1-499-503.
18. Модернизация компрессора 4M16M-45-35/55. URL: <https://chemtech.ru/sovremennye-tendencii-razvitiya-gorelochnyh-ustrojstv/> (дата обращения: 06.03.2023).
19. Воздушные турбокомпрессоры Tamturbo. URL: <http://compressor-atlas.ru/turbocompressor-tamturbo.html> (дата обращения: 08.05.2023).
20. Центробежные компрессоры SAMSUNG TECHWIN. URL: <https://stechwin.ru/> (дата обращения: 18.06.2023).
21. Компрессоры для систем кондиционирования. URL: <http://danfos.moscow/> (дата обращения: 18.06.2023).
22. Васильев Ю. С., Петреня Ю. К., Солдатова К. В. [и др.]. Труды политехнической научной школы турбокомпрессоростроения 21 века: моногр. Санкт-Петербург: Политех-ПРЕСС, 2023. 384 с. ISBN 978-5-7422-8024-8. EDN: IPZPYO.
23. Юша В. Л., Громов А. Ю., Потапов Ю. А. Анализ перспективных направлений создания отечественной компо-

нентной базы ротационных машин объёмного действия для малой энергетики, холодильной и климатической техники // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 4. С. 9–25. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-4-9-25.

24. Российская промышленность сотворила очередное чудо, в которое отказываются верить западные эксперты. URL: https://dzen.ru/a/ZJRdZ-1bt3q_yFy (дата обращения: 23.06.2023).

25. Юша В. А. Создание и совершенствование ступеней компрессоров объёмного действия для автономных мобильных установок: дисс. ... д-ра техн. наук. Омск, 2008. 434 с.

26. Головинцев А. Г., Румянцев В. А., Ардашев В. И. [и др.]. Ротационные компрессоры. Москва: Машиностроение, 1964. 315 с.

27. Сакун И. А. Винтовые компрессоры. Ленинград: Машиностроение, 1970. 400 с.

28. Амосов П. Е., Бобриков Н. И., Шварц А. И. [и др.]. Винтовые компрессорные машины. Справочник. Ленинград: Машиностроение, 1977. 256 с.

29. Райковский Н. А., Юша В. А., Коренев В. А., Кузнецов К. И., Карпусь В. С. Анализ механических потерь в рабочей камере ротационно-пластинчатых машин // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 1. С. 23–32. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-1-23-32.

30. Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств»: приказ от 15.12.2020 г. № 533 / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=390702> (дата обращения: 23.06.2023).

31. ГОСТ Р 54802-2011 (ИСО 13631:2002). Нефтяная и газовая промышленность. Компрессоры поршневые газовые агрегатированные. Технические требования. Введ. 2013–06–01. Москва: Стандартинформ, 2014. 92 с.

ЮША Владимир Леонидович, доктор технических наук, профессор (Россия), г. Омск.

SPIN-код: 1503-9666

ORCID: 0000-0001-9858-7687

AuthorID (SCOPUS): 6505861937

ResearcherID: J-8079-2013

Адрес для переписки: 1978yusha@mail.ru

СУТЯГИНСКИЙ Михаил Александрович, председатель совета директоров АО «Группа компаний «Титан», г. Омск.

ГРОМОВ Антон Юрьевич, кандидат технических наук, заместитель генерального директора по гражданской продукции АО НТК «Криогенная техника», г. Омск.

Адрес для переписки: azot111@bk.ru

УШАКОВ Петр Валерьевич, первый заместитель генерального директора АО НТК «Криогенная техника», г. Омск.

ПОТАПОВ Юрий Алексеевич, кандидат технических наук, главный специалист департамента по развитию и новым технологиям АО «Группа компаний «Титан», г. Омск.

Для цитирования

Юша В. А., Сутягинский М. А., Громов А. Ю., Ушаков П. В., Потапов Ю. А. О взаимосвязи цифровых технологических платформ крупных химических и нефтеперерабатывающих производств с техническим обликом парка компрессорного оборудования // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 4. С. 25–32. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-25-32.

Статья поступила в редакцию 28.02.2023 г.

© В. А. Юша, М. А. Сутягинский, А. Ю. Громов,

П. В. Ушаков, Ю. А. Потапов

ON THE RELATIONSHIP OF DIGITAL TECHNOLOGICAL PLATFORMS OF LARGE CHEMICAL AND OIL REFINING INDUSTRIES WITH THE TECHNICAL APPEARANCE OF THE COMPRESSOR EQUIPMENT FLEET

V. L. Yusha, M. A. Sutyaginskiy¹, A. Yu. Gromov², P. V. Ushakov², Yu. A. Potapov¹

¹ «Group of companies «Titan» JSC,
Russia, Omsk, Gubkin Ave., 30, 644035

² Scientific and technical complex «Cryogenic technique» JSC,
Russia, Omsk, 22 Parts'ezda str., bld. 97/1, 644105

Issues related to possible problems in the implementation of digitalization programs for large enterprises for the processing of natural hydrocarbon and mineral raw materials, due to the discrepancy between the technical level of the existing fleet of compressor equipment of these enterprises, both with the requirements of modern production and modern achievements in the field of compressor engineering, are considered. It is noted that the discrepancy between virtual and physical technological objects leads to an overestimation of the costs of creating and maintaining IT products, as well as to a decrease in their efficiency. The ways of improving the element base of compressor equipment are proposed. A theoretical analysis of the functioning of an alternative design of a rotary vane compressor with water supply to its flow part is performed. Its example shows that there are obvious prerequisites for replacing the fleet of existing reciprocating process compressors with more advanced designs, the production of which can be completely based on domestic technologies and localized in the Russian Federation in the interests of the core industries of the processing industry.

Keywords: digitalization, reliability, operational characteristics, reciprocating compressors, water injection rotary vane compressors, mathematical model.

References

1. Shest' klyuchevykh zadach v ekonomike Rossii na 2023 god. Stenogramma vystupleniya Vladimira Putina na zasedanii Soveta po strategicheskemu razvitiyu i natsional'nym proyektam [Six key tasks in the Russian economy for 2023. Transcript of Vladimir Putin's speech at a meeting of the Council for Strategic Development and National Projects]. URL: <https://rg.ru/2022/12/15/stenogramma> (accessed: 16.12.2022). (In Russ.).
2. TSIPR 2023: Osnovnyye porucheniya Mikhaila Mishustina [CIRP 2023: Key Assignments of Mikhail Mishustin]. URL: <https://www.content-review.com/articles/60029/> (accessed: 02.06.2023). (In Russ.).
3. German Gref nazval pyat' tekhnologiy dlya dostizheniya pervenstva v mire [Herman Gref named five technologies to achieve world supremacy]. URL: <https://www.vedomosti.ru/finance/articles/2023/04/12/970619-gref-opisal-osnovi-dlya-tehnologicheskogo-proriva-rossii> (accessed: 20.05.2023). (In Russ.).
4. «Gazprom neft'» i kompaniya «Tsifra» sozdali rossiyskuyu tsifrovuyu platformu dlya upravleniya proizvodstvom [Gazprom Neft and Tsifra Group created a Russian digital platform for production management]. URL: <https://www.itweek.ru/iot/news-company/detail.php?ID=222937> (accessed: 24.02.2023). (In Russ.).
5. Tretyakov N. A., Cherepovitsyn A. E. Tsifrovaya transformatsiya arkticheskogo neftegazovogo kompleksa: novyye vyzovy i vozmozhnosti [Digital transformation of the arctic oil and gas industrial complex: new challenges and opportunities] // Sever i rynek: formirovaniye ekonomicheskogo poriyadka // Sever i rynek: formirovaniye ekonomicheskogo poriyadka. Sever i Rynek: Formirovanie Ekonomicheskogo Poriyadka 2022. No. 1. P. 17 – 32. DOI: 10.37614/2220-802X.1.2022.75.002. EDN: CMPQGG. (In Russ.).
6. Effektivnoye proizvodstvo 4.0 (mashinostroyeniye i metalloobrabotka): prakt. prom. konf. [Efficient Production 4.0 (mechanical engineering and metalworking): practical industrial conference]. URL: <https://oe-conf.ru/materials> (accessed: 24.02.2023). (In Russ.).
7. Mask schitayet, chto razvitiye II mozhet grozit' unichtozheniyem chelovechestva [Musk believes the development of Artificial Intelligence could threaten to destroy humanity]. URL: <https://news.mail.ru/society/55871015/?> (accessed: 18.04.2023). (In Russ.).
8. Delyagin M. G. Informatsionnyye tekhnologii protiv razuma: postanovka problem [Information technology versus reason: framing the problem]. URL: <https://delyagin.ru/articles/183-sobytiya/109652-informatsionnye-tehnologii-protiv-razuma-postanovka-problemy> (accessed: 28.05.2023). (In Russ.).
9. GOST R 53737-2009 (ISO 13707:2000). Neftyanaya i gazovaya promyshlennost'. Porshnevyye kompressory: Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya [Petroleum and natural gas industries. Reciprocating compressors. General technical requirements]. Moscow, 2012. 156 p. (In Russ.).
10. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya po remontu porshnevnykh kompressorov [General technical conditions for repair of reciprocating compressors]. Volgograd, 1985. 363 p. (In Russ.).
11. Plastinin P. I. Porshnevyye kompressory. V 2 t. T. 2. Osnovy proyektirovaniya. Konstruktsii [Piston compressors. In 2 vols. Vol. 2. Fundamentals of design. Constructions]. Moscow, 2008. 711 p. (In Russ.).
12. Vidyakin Yu. A., Dobrovolskiy E. B., Kondratyeva T. F. Oppozitnyye kompressory [Opposite compressors]. Leningrad, 1979. 279 p. (In Russ.).
13. RD 39-0148139-0001-2000. Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta kompressornykh stantsiy na baze

tekhnikeskoy diagnostiki [System of maintenance and repair of compressor stations based on technical diagnostics]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200082157> (accessed: 06.03.2023). (In Russ.).

14. Baykov I. R., Kitayev S. V., Fayrushin Sh. Z. Diagnostirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya porshnevnykh kompressorov [Diagnostics of reciprocating compressors' technical conditions] // *Energobezopasnost' i energosberezheniye. Energy Security and Energy Saving*. 2015. No. 3 (63). P. 28–30. (In Russ.).

15. Fuladivanda M., Heidary M. A. Issledovaniye vliyaniya khlorid-ionov na podpitochnyye vodorodnyye kompressory [A study into the impact of chloride ions on the make-up hydrogen compressors] / trans. from Engl. M. A. Fedorova // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2022. Vol. 6, no. 1. P. 75–84. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-1-75-84. (In Russ.).

16. Zakharenko A. V., Zakharenko V. P. O raschete nagruzok v mnogokol'tsevom porshnevom uplotnenii kompressorov bez smazki vysokogo davleniya [Calculating loads for a multi-ring piston seal in high-pressure oil-free compressors] // *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. Journal of International Academy of Refrigeration*. 2012. No. 2. P. 29–32. (In Russ.).

17. Busarov S. S., Belikov A. V., Kapelyukhovskiy A. A., Kapelyukhovskaya A. A. Analiz konkurentosposobnosti vodorodosoderzhashchikh tsirkulyatsionnykh kompressorov na baze tikhokhodnykh dlinnokhodovykh stupeney [Analysis of the competitiveness of hydrogen-containing circulation compressors based on low-speed long-stroke stages] // *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskoye nauki. Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*. 2023. Issue 1. P. 499–503. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-1-499-503. (In Russ.).

18. Modernizatsiya kompressora 4M16M-45-35/55 [Modernization of 4M16M-45-35/55 compressor]. URL: <https://chemtech.ru/sovremennyye-tendencii-razvitiya-gorelochnykh-ustroystv/> (accessed: 06.03.2023). (In Russ.).

19. Vozdushnyye turbokompressory Tamturbo [Tamturbo air turbochargers]. URL: <http://compressor-atlas.ru/turbocompressor-tamturbo.html> (accessed: 08.05.2023). (In Russ.).

20. Tsentrobezhnyye kompressory SAMSUNG TECHWIN [SAMSUNG TECHWIN centrifugal compressors]. URL: <https://stechwin.ru/> (accessed: 18.06.2023). (In Russ.).

21. Kompressory dlya sistem konditsionirovaniya [Compressors for air conditioning systems]. URL: <http://danfos.moscow/> (accessed: 18.06.2023). (In Russ.).

22. Vasil'yev Yu. S., Petrenya Yu. K., Soldatova K. V. [et al.]. Trudy politekhnicheskoy nauchnoy shkoly turbo-kompressorostroyeniya 21 veka [Proceedings of the Polytechnic Scientific School of Turbocompressor Engineering of the 21st Century]. Saint Petersburg, 2023. 384 p. ISBN 978-5-7422-8024-8. EDN: IPZPYO. (In Russ.).

23. Yusha V. L., Gromov A. Yu., Potapov Yu. A. Analiz perspektivnykh napravleniy sozdaniya otechestvennoy komponentnoy bazy rotatsionnykh mashin ob'yemnogo deystviya dlya maloy energetiki, kholodil'noy i klimaticheskoy tekhniki [The analysis of promising directions for creation of domestic component base of volumetric rotary machines for low power energy, refrigeration and climate technology] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2022. Vol. 6, no. 4. P. 9–25. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-4-9-25. (In Russ.).

24. Rossiyskaya promyshlennost' sotvorila ocherednoye chudo, v kotoroye otkazyvayutsya verit' zapadnyye eksperty [Russian industry has created yet another miracle that Western experts refuse to believe in]. URL: https://dzen.ru/a/ZJRdZ-1bt3q_yFy (accessed: 23.06.2023). (In Russ.).

25. Yusha V. L. Sozdaniye i sovershenstvovaniye stupeney kompressorov ob'yemnogo deystviya dlya avtonomnykh mobil'nykh ustanovok [Creation and improvement of volumetric

compressor stages for autonomous mobile units]. Omsk, 2008. 434 p. (In Russ.).

26. Golovintsev A. G., Rumyantsev V. A., Ardashev V. I. [et al.]. Rotatsionnyye kompressory [Rotary compressors]. Moscow, 1964. 315 p. (In Russ.).

27. Sakun I. A. Vintovyye kompressory [Screw compressors]. Leningrad, 1970. 400 p. (In Russ.).

28. Amosov P. E., Bobrikov N. I., Shvarts A. I. [et al.]. Vintovyye kompressornyye mashiny. Spravochnik [Screw compressor machines. Handbook]. Leningrad, 1977. 256 p. (In Russ.).

29. Raikovskiy N. A., Yusha V. L., Kuznetsov K. I., Korenev V. A., Karpus V. S. Analiz mekhanicheskikh poter' v rabochey kamere rotatsionno-plastinchatyykh mashin [Analysis of mechanical losses in working chamber of rotary vane machines] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2020. Vol. 4, no. 1. P. 23–32. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-1-23-32. (In Russ.).

30. Ob utverzhdenii federal'nykh norm i pravil v oblasti promyshlennoy bezopasnosti «Obshchiye pravila vzryvobezopasnosti dlya vzryvopozharoopasnykh khimicheskikh, neftekhimicheskikh i neftepererabatyvayushchikh proizvodstv»: prikaz ot 15.12.2020 g. № 533 [On approval of federal norms and rules in the field of industrial safety «General rules of explosion safety for explosion and fire hazardous chemical, petrochemical and oil refining production facilities»: Order No. 533 dated 15.12.2020]. URL: https://normativ.kontur.ru/document?modulel_d=1&documentId=390702 (accessed: 23.06.2023). (In Russ.).

31. GOST R 54802-2011 (ISO 13631:2002). Neftyanaya i gazovaya promyshlennost'. Kompressory porshnevyye gazovyye agregirovannyye. Tekhnicheskoye trebovaniya [Petroleum and natural gas industries. Packaged reciprocating gas compressors. Technical requirements]. Moscow, 2014. 92 p. (In Russ.).

YUSHA Vladimir Leonidovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Omsk.

SPIN-code: 1503-9666

ORCID: 0000-0001-9858-7687

AuthorID (SCOPUS): 6505861937

ResearcherID: J-8079-2013

Correspondence address: 1978yusha@mail.ru

SUTYAGINSKIY Mikhail Alexandrovich, Chairman of the Board of Directors of «Group of companies «Titan» JSC, Omsk.

GROMOV Anton Yuryevich, Candidate of Technical Sciences, Deputy General Director for Civilian Products of Scientific and Technical Complex «Cryogenic Technique» JSC, Omsk.

Correspondence address: azot111@bk.ru

USHAKOV Petr Valeryevich, First Deputy General Director of Scientific and Technical Complex «Cryogenic Technique» JSC, Omsk.

POTAPOV Yuri Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Chief Specialist of Development and New Technologies Department of «Group of companies «Titan» JSC, Omsk.

For citations

Yusha V. L., Sutyaginskiy M. A., Gromov A. Yu., Ushakov P. V., Potapov Yu. A. On the relationship of digital technological platforms of large chemical and oil refining industries with the technical appearance of the compressor equipment fleet // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2023. Vol. 7, no. 4. P. 25–32. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-25-32.

Received February 28, 2023.

© V. L. Yusha, M. A. Sutyaginskiy, A. Yu. Gromov,

P. V. Ushakov, Yu. A. Potapov

ОПТИМИЗАЦИЯ СТУПЕНЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ

Е. В. Дубинин, Б. Ф. Идиятуллин, Н. Г. Хасанов

АО «НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа»,
Россия, 420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, 40

В материале описана работа по повышению гидравлической эффективности проточной части ступени центробежного компрессора за счет применения автоматических алгоритмов оптимизации. Критерием оптимизации является политропный КПД ступени компрессора промежуточного типа. Представлена последовательность этапов процесса оптимизации в программном модуле Fine/Design3D пакета программного обеспечения Numeca. Приводится пояснение процесса создания твердотельной модели ступени сжатия. Также представлены газодинамические характеристики разрабатываемой ступени после оптимизации формы роторных и статорных элементов.

Ключевые слова: проточная часть, центробежный компрессор, энергоэффективность, газодинамическая характеристика, CFD, Numeca, оптимизация.

Постоянный поиск эффективных технологических циклов производства продукции в химии, нефтехимии и связанных с ними отраслей промышленности предъявляют повышенные требования к показателям эффективности энергетических установок, участвующих в данных процессах. Увеличение производств и масштабов оборудования приводит к повышенным требованиям к потреблению мощности турбомашин и связанным с этим расходам ресурсов на привод энергоустановок.

Повышенные материальные затраты, связанные со стоимостью энергии также заставляют проектировщиков технологических циклов закладывать высокоэффективные энергоустановки в рамках производств.

Разработка новых проточных частей центробежных компрессоров занимает главное место в процессе снижения потребляемой мощности при работе технологических линий. Даже небольшое относительное повышение эффективности работы компрессора большой мощности в абсолютном исчислении даёт существенное снижение потребления электроэнергии или топливного газа.

Проектирование центробежных компрессоров по безразмерным газодинамическим характеристикам для дискретного ряда ступеней проточной части АО «НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа» в основном удовлетворяет потребности заказчиков оборудования, однако в частных случаях возникает необходимость в повышении уровня энергоэффективности корпусов сжатия при обработке заявок на крупномасштабные проекты, которые подразумевают потребляемую мощность в десятки мегаватт.

Наличие современных программных комплексов для получения характеристик проточных частей позволяет оперативно оценивать актуальность тех или иных вариантов исполнения ступеней в рамках спроектированных компрессоров.

Проектирование новых ступеней является довольно трудоёмким и наукоёмким процессом [1]. Также для уверенного применения вновь спроектированных ступеней желательна верификация ре-

зультатов расчёта характеристик по натурным испытаниям. При необходимости расширения области применения ступеней компрессоров, повышения уровня энергоэффективности может производиться оптимизация характеристик применяемых элементов проточной части или всей ступени. Такой вариант позволяет первоначально с высоким уровнем совпадения отстроить расчёты как по одномерным и квазитрёхмерным, так и по конечноэлементным моделям.

Методы проектирования и оптимизации проточных частей на основе средней линии тока, которые описывают математические модели течения газа в каналах проточных частей, требуют подбора эмпирических коэффициентов, характеризующих потери в элементах ступени компрессора. Для этого требуется большая база данных, которая с большой достоверностью учитывает влияние геометрических параметров элементов на газодинамические характеристики рассматриваемой ступени. Также данные методики в случае выхода за пределы расчётных областей могут потребовать последовательного приближения результатов получаемых характеристик при помощи натурального эксперимента или расчётов методами вычислительной гидродинамики (CFD).

Ручной перебор геометрических параметров ступеней с целью оптимизации формы проточной части занимает много времени, а также сильно зависит от квалификации исполнителя и его способности предсказывать результат на уровне своей интуиции. Требуется проведение промежуточных расчётов для получения характеристик, что также подразумевает временные затраты на построение сеточных моделей и проведение ВГД (вычислительная гидродинамика) расчётов с модифицированной геометрией моделей.

Актуальным на данный момент способом повышения газодинамической эффективности проточных частей центробежных компрессоров является метод автоматической оптимизации в полной трёхмерной постановке с привлечением средств вычислительной гидродинамики [2–8].

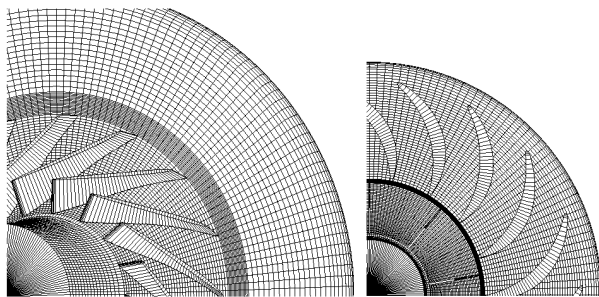


Рис. 1. Твердотельная модель исходной ступени и наложенная сетка для квазитрехмерных расчетов
Fig. 1. Solid-state model of the initial stage and overlaid grid for quasi-three-dimensional calculations

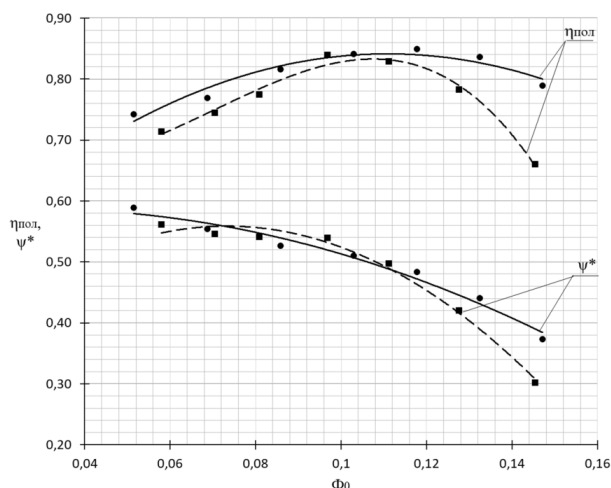


Рис. 2. Зависимости КПД политропного по статическим параметрам и коэффициента напора по полным параметрам от условного коэффициента расхода исследуемой ступени по результатам натурного эксперимента и верификации CFD модели:
—■— результат натурных испытаний ступени ГПА при $Mu = 0,70$;
—●— результат CFD расчета ступени ГПА при $Mu = 0,70$
Fig. 2. Dependence of the efficiency of a polytropic process on static parameters and the head coefficient on total parameters on the conditional flow coefficient of the investigated stage based on the results of a natural experiment and verification of the CFD model:
—■— result of natural testing of the gas turbine stage at $Mu = 0,70$;
—●— result of CFD calculation of the gas turbine stage at $Mu = 0,70$

С целью автоматизации задачи поиска оптимальной геометрии для совершенствования ступеней сжатия турбомашин в АО «НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа» применяется модуль Fine/Design3D пакета программ Numeca [9].

В качестве примера проектирования и оптимизации представлена модельная ступень центробежного компрессора на условный коэффициент расхода $\Phi_0 = 0,086$. Ступень имеет межопорное расположение, включает рабочее колесо (РК), безлопаточный диффузор (БД) и обратно-направляющий аппарат (ОНА). Работа над новым рядом проточной части проводится с целью повышения энергетической эффективности и динамической стабильности роторов центробежных компрессоров [10, 11].

Уверенность в достоверности расчёта до этапа экспериментальных исследований обеспечивается созданием новой ступени на базе ступени-аналога с известной газодинамической характеристикой,

на основе которой подтверждается (верифицируется) газодинамическая модель. В данном качестве использована ступень ГПА (газоперекачивающий агрегат) с условным коэффициентом расхода $\Phi_0 = 0,11$ [12], подтвердившая высокий КПД политропный и широкий диапазон работы по расходу при модельных и натурных испытаниях. Твердотельная модель исходной ступени и её экспериментальная безразмерная газодинамическая характеристика, полученная по значениям параметров, измеренных на входе в ступень и на выходе из БД, а также результаты верификации CFD модели, взятые по тем же контрольным сечениям, показаны на рис. 1 и 2.

Использованы блочно-структурированные «низкорейнольдсовы» расчётные сетки. Расчёт проведен в стационарной постановке, модель турбулентности Спалларта—Алмараса выбрана как наиболее склонная к отрывным явлениям с целью иметь больший запас газодинамической устойчивости в эксперименте.

Приведение к требуемому расходу вновь разрабатываемой ступени $\Phi_0 = 0,11 \rightarrow 0,086$ осуществляется пропорциональной подрезкой меридионального контура рабочего колеса исходной ступени со стороны основного диска, с постоянным коэффициентом по длине канала. Данную подрезку необходимо было осуществить в связи с увеличением, в соответствии с техническим заданием, относительного втулочного диаметра $\bar{d}_0 = d_0/D_2$ новой ступени с 0,28 до 0,4, что как раз обеспечивает требуемый коэффициент расхода.

На основе модифицированной по расходу твердотельной модели ступени строилась параметрическая геометрия — дискретно заданные координаты лопаток и меридиональных обводов описывались кривыми с управляемыми полюсами, определялось распределение лопаточных углов и толщин по длине канала. Местоположение полюсов кривых и число лопаток РК и ОНА являются параметрами оптимизации. Построение производилось в ПО Aхcent. Параметрическая геометрия ступени с наложенным диапазоном изменения формы проточной части представлена на рис. 3.

Параметрическая геометрия служит основой для построения конечно-элементной низкорейнольдсовой блочно-структурированной расчётной сетки. Создается сеточный шаблон, включающий в себя основную информацию — число ячеек в блоках, периодичность сетки, точки привязки блоков к геометрии. В процессе оптимизации, при изменении геометрических параметров, сетка деформируется вслед за газодинамическим каналом, сохраняя топологию блоков. Сетки одного межлопаточного блока, изменяющиеся в процессе оптимизации, показаны на рис. 4.

Критерием оптимизации является максимум политропного КПД ступени по заторможенным параметрам. Задача однокритериальная, точка помпажа принимается по факту, в силу малых лопаточных углов, помпажный запас получался удовлетворяющим техническому заданию на всех вариантах геометрии. Параметрами оптимизации являются положения полюсов сплайнов, описывающих геометрию проточной части.

Сходимость задачи оптимизации представлена на рис. 5 в виде графика с множеством решений отдельных конструкций ступени. Где по оси абсцисс отложены номер итерации, а по оси ординат — значение политропного КПД ступени.

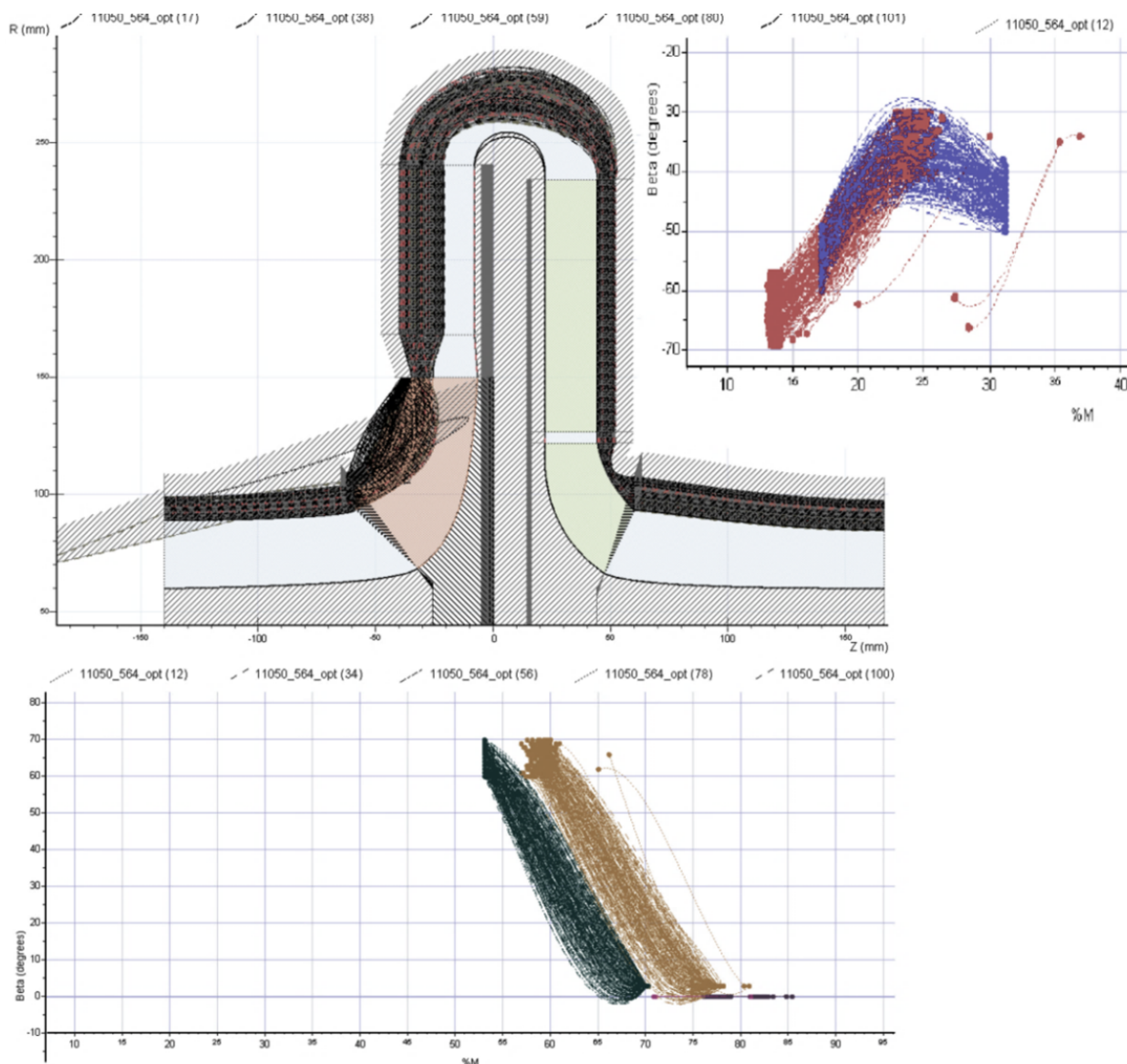


Рис. 3. Параметрическая геометрия ступени с наложенным диапазоном изменения формы проточной части
Fig. 3. Parametric geometry of a stage with an imposed range of variation in the shape of the flow passage

На первом этапе оптимизации формировался план эксперимента — геометрия создавалась случайным набором параметров оптимизации в пределах установленных ограничений. Естественно, часть геометрических моделей имела нетехнологичный и нефизичный вид, что приводило к деформации расчётной сетки, расчёт при этом не мог быть выполненным. Поэтому на основе рекомендаций число геометрий (250) было в 10 раз больше параметров оптимизации (21). Каждая геометрия рассчитывалась CFD решателем (синие точки на рис. 5).

Аппроксимирует базу данных модель, которая строится для определения аналитических связей между входными и выходными параметрами. Оптимизационный алгоритм работает на базе суррогатной модели. CFD решение для каждой созданной геометрической формы проточной части ступени проводится на каждой итерации оптимизации. Данные по результатам расчёта добавляются в базу данных, после чего внутренние алгоритмы модуля Fine/Design3D уточняют суррогатную модель для дальнейшего формулирования плана эксперимента. Таким образом, в процессе оптимизации точность суррогатной модели возрастает. Оптимизация, то

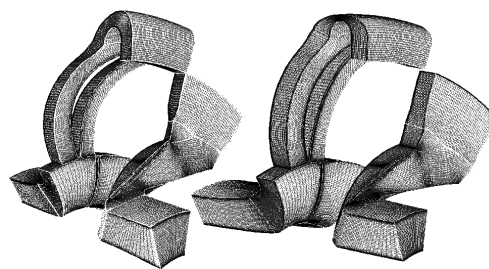


Рис. 4. Сетки одного межлопаточного блока, изменяющиеся в процессе оптимизации
Fig. 4. Grids of a single inter-blade block, varying during the optimization process

есть поиск экстремума функции отклика, полученной на основе базы данных, производится с использованием генетических алгоритмов, точки оптимизации обозначены круглыми маркерами.

На рис. 5 видно, что значения точек политропно-го КПД базы данных (треугольные маркеры) имеют максимальный разброс, а разброс значений точек политропно-го КПД оптимизации (круглые маркеры)

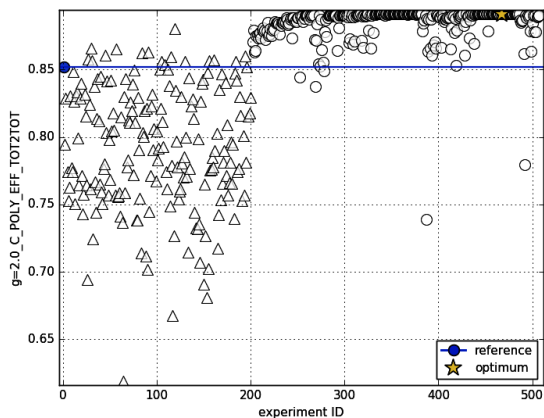


Рис. 5. Сходимость задачи оптимизации: треугольные маркеры — случайный набор параметров оптимизации; круглые маркеры — целенаправленный поиск максимума политропного КПД в зависимости от итерации
Fig. 5. Convergence of the optimization problem: triangle markers — random set of optimization parameters; circular markers — targeted search for maximum polytropic efficiency depending on the iteration

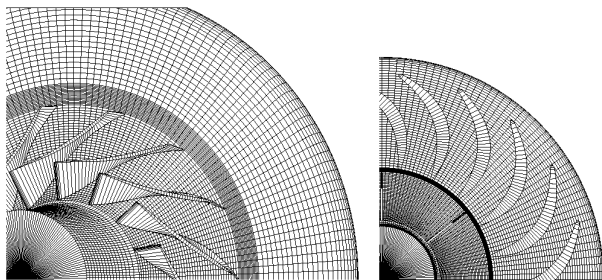


Рис. 6. Твердотельная модель оптимизированной ступени
Fig. 6. Solid-state model of the optimized stage

сокращается. При этом дальнейшее решение задачи не приводит к нахождению более эффективной геометрии среди ранее найденных оптимальных конструкций. Поэтому задачу оптимизации можно считать сошедшейся.

Результатирующая оптимальная геометрия ступени, её газодинамическая характеристика по результатам CFD расчета, построенная по параметрам в контрольных сечениях на входе и на осевой подвод и на выходе из БЛД, а также экспериментальная газодинамическая характеристика, взятая по тем же контрольным сечениям, представлены на рис. 6 и 7 соответственно.

Одним из ощутимых недостатков газодинамической модели является сложность вариантных расчётов с учетом протечки рабочего тела по покрывному диску с нагнетания ступени на всасывание. Однако данное явление нивелируется применением в новых ступенях АО «НИИТурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа» контактных лабиринтных уплотнений, практически нивелирующих влияние протечки рабочего тела на газодинамическую характеристику ступени.

Таким образом, программный модуль Fine/Design3D хорошо зарекомендовал себя при проектировании ступеней, где требуется создание новой геометрии, отвечающий всем требованиям технического задания.

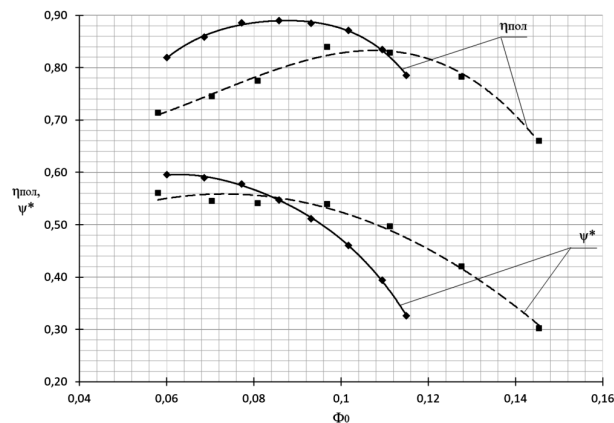


Рис. 7. Зависимости КПД политропного по статическим параметрам и коэффициента напора по полным параметрам от условного коэффициента расхода исследуемой ступени по результатам натурного эксперимента и результатам оптимизации проточной части.

Политропный КПД
рассчитан по сечениям: осевой вход в ступень — выход из диффузора:

— ■ — результат натурных испытаний ступени ГПА при $Mu = 0,70$;

— ● — характеристика оптимизированной ступени при $Mu = 0,80$ в результате CFD расчета
Fig. 7. Dependence of the polytropic efficiency based on static parameters and the head coefficient based on total parameters on the conditional flow coefficient of the investigated stage, as determined by the results of a physical experiment and the optimization results of the flow passage.

The polytropic efficiency is calculated for the following sections: axial inlet to the stage — exit from the diffuser:

— ■ — result of natural testing of the gas turbine stage at $Mu = 0,70$;
— ● — characteristics of the optimized stage at $Mu = 0,80$ as a result of CFD calculation

Данный программный модуль значительно облегчает трудоемкий процесс создания геометрической модели. Освобождает от ручного перебора большого количества вариантов различной геометрии, в изысканиях оптимальной формы проточной части, что значительно сокращает временные затраты проектирования.

К недостаткам данного метода можно отнести тот факт, что полученный в процессе оптимизации конечный результат, так же как и промежуточные варианты геометрии, как правило, не до конца соответствуют требованиям технологичности, то есть имеют сложные для механической обработки формы. Изготовление таких деталей несёт в себе повышенные трудозатраты. Указанный недостаток в процессе оптимизации требует последующего упрощения форм проточных частей с применением САПР инженером-конструктором.

Модификации подвергается наиболее удачная, с точки зрения технологичности, геометрическая модель, удовлетворяющая критерию оптимизации, причём таким образом, чтобы конечный результат имел минимальные отклонения от полученных результатов в ходе оптимизации.

Список источников

1. Cumpsty N. A. Compressor Aerodynamics. 5th ed. Longman, London. 1999. 509 p.
2. Hassan M. A., Reddy K. T. Energy optimization of a centrifugal compressor along with wedge diffuser using ANN-coupled CFD // Journal of the Brazilian Society of Mechanical

Sciences and Engineering. 2022. Vol. 44 (10). 442. DOI: 10.1007/s40430-022-03754-x.

3. Baert L., Beauthier C., Leborgne M. [et al.]. Surrogate-Based Optimisation for a Mixed-Variable Design Space: Proof of Concept and Opportunities for Turbomachinery Applications // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. Vol. 2 C: Turbomachinery. 2015. DOI: 10.1115/GT2015-43254.

4. Ochabski T., van der Spuy J., Hildebrandt T. A Large Design Space Multidisciplinary Optimization of a Mixed Flow Micro Gas Turbine Compressor Stage // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Vol. 8: Industrial and Cogeneration; Manufacturing Materials and Metallurgy; Marine; Microturbines, Turbochargers, and Small Turbomachines. 2020. DOI: 10.1115/GT2020-14259.

5. Huang S., Lu X., Han G. [et al.]. Research on aerodynamic optimization design method and flow mechanism of a high-subsonic compressor cascade // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2023. Vol. 16 (1). P. 316–334. DOI: 10.1080/19942060.2021.2020170.

6. Неверов В. В., Любимов А. Н., Чеглаков И. В. Вычислительная газодинамика как инструмент повышения качества, надежности и скорости проектирования проточных частей турбокомпрессоров // Компрессоры и компрессорное оборудование: тр. Междунар. симп. им. К. П. Селезнева. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. С. 42–49. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id18-98. EDN: YVGDVZ.

7. Данилишин А. М., Кожухов Ю. В. Алгоритм и примеры многопараметрической автоматизированной расчетной оптимизации компрессорных ступеней с осерадиальными рабочими колесами турбодетандерных агрегатов // Вестник Международной академии холода. 2022. № 2. С. 27–34. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-27-34.

8. Маренина Л. Н., Галеркин Ю. Б., Дроздов А. А. [и др.]. Опыт оптимизации неподвижных элементов ступеней центробежных компрессоров // Компрессорная техника и пневматика. 2022. № 1. С. 2–11. EDN: VUCKZO.

9. NUMECA. URL: <https://www.numeca.de/en/products-design-optimisation/> (дата обращения: 27.09.2023).

10. Хасанов Н. Г., Дубинин Е. В., Хуснутдинов И. Ф., Лунев А. Т. Численное моделирование характеристик центро-

бежных компрессоров и турбин в АО «НИИТурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа» // Компрессорная техника и пневматика. 2023. № 2. С. 28–31. EDN: PSHWBG.

11. Хасанов Н. Г., Хуснутдинов И. Ф., Муртазин Р. Ф., Дубинин Е. В. Расчётно-экспериментальное исследование высокорасходной модельной ступени центробежного компрессора с повышенным втулочным отношением // Компрессорная техника и пневматика. 2022. № 4. С. 37–39. EDN: DKVXSf.

12. Лунев А. Т. Разработка высокоэффективных сменных проточных частей центробежных компрессоров газоперекачивающих агрегатов: автореф. дисс. канд. наук. Казань, 2005. 16 с.

ДУБИНИН Евгений Владимирович, начальник бюро АО «НИИТурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа», г. Казань.

Адрес для переписки: evgeniy.dubinin@niitk.ru

ИДИЯТУЛЛИН Булат Фанисович, инженер по расчетам и режимам 2-й категории АО «НИИТурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа», г. Казань.

Адрес для переписки: [Bulat.Idiatullin@niitk.ru](mailto:bulat.idiatullin@niitk.ru)

ХАСАНОВ Нариман Гаязович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник АО «НИИТурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа», г. Казань.

SPIN-код: 7765-5764

AuthorID (РИНЦ): 898713

Адрес для переписки: Nariman.Khasanov@niitk.ru

Для цитирования

Дубинин Е. В., Идиятуллин Б. Ф., Хасанов Н. Г. Оптимизация ступеней центробежных компрессоров // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 4. С. 33–39. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-33-39.

Статья поступила в редакцию 28.09.2023 г.

© Е. В. Дубинин, Б. Ф. Идиятуллин, Н. Г. Хасанов



OPTIMIZATION OF CENTRIFUGAL COMPRESSOR STAGES

E. V. Dubinin,
B. F. Idiyatullin, N. G. Khasanov

NIIturbokompressor JSC,
Russia, Kazan, Sibirsky Trakt str., 40, 420029

The article describes a hydraulic efficiency increase in the centrifugal compressor stage using automatic optimization algorithms. The optimization criterion is the polytropic efficiency of the intermediate compressor stage. The sequence of stages of the optimization process in the Fine/Design3D software module of the Numeca software package is presented. The creating process a solid model of the compression stage is shown. The performance curves of the developed stage after optimization of the shape of the rotor and stator elements are also presented.

Keywords: flow pass, centrifugal compressor, energy efficiency, performance curves, CFD, Numeca, optimization.

References

1. Cumpsty N. A. Compressor Aerodynamics. 5th ed. Longman, London. 1999. 509 p. (In Engl.).
2. Hassan M. A., Reddy K. T. Energy optimization of a centrifugal compressor along with wedge diffuser using ANN-coupled CFD // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2022. Vol. 44 (10). 442. DOI: 10.1007/s40430-022-03754-x. (In Engl.).
3. Baert L., Beauthier C., Leborgne M. [et al.]. Surrogate-Based Optimisation for a Mixed-Variable Design Space: Proof of Concept and Opportunities for Turbomachinery Applications // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. Vol. 2 C: Turbomachinery. 2015. DOI: 10.1115/GT2015-43254. (In Engl.).
4. Ochabski T., van der Spuy J., Hildebrandt T. A Large Design Space Multidisciplinary Optimization of a Mixed Flow Micro Gas Turbine Compressor Stage // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Vol. 8: Industrial and Cogeneration; Manufacturing Materials and Metallurgy; Marine; Microturbines, Turbochargers, and Small Turbomachines. 2020. DOI: 10.1115/GT2020-14259. (In Engl.).
5. Huang S., Lu X., Han G. [et al.]. Research on aerodynamic optimization design method and flow mechanism of a high-subsonic compressor cascade // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2023. Vol. 16 (1). P. 316–334. DOI: 10.1080/19942060.2021.2020170. (In Engl.).
6. Neverov V. V., Lyubimov A. N., Cheglakov I. V. Vychislitel'naya gazodinamika kak instrument povysheniya kachestva, nadezhnosti i skorosti proyektirovaniya protochnykh chastey turbokompressorov [Computational gas dynamics as a tool for improving the quality, reliability and velocity of turbocompressors flow parts design] // Kompresory i kompressoroye oborudovaniye. *Compressors and Compressor Equipment*. Saint Petersburg, 2018. P. 42–49. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id18-98. EDN: YVGDVZ. (In Russ.).
7. Danilishin A. M., Kozhukhov Yu. V. Algoritm i primery mnogoparametricheskey avtomatizirovannoy raschetnoy optimizatsii kompressornykh stupeney s oseradial'nymi rabochimi kolesami turbodetandernykh agregatov [Algorithm and the examples of multiparametric automated computational optimization for turboexpander compressor stage 3D impellers] // Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2022. No. 2. P. 27–34. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-27-34. (In Russ.).
8. Marenina L. N., Galerkin Yu. B., Drozdov A. A. [et al.]. Opyt optimizatsii nepodviznykh elementov stupeney tsentrobezhnykh kompressorov [Creation of parametrized model of return channel flow path for CFD-optimization] // Kompessornaya tekhnika i pnevmatika. *Compressor and Pneumatics*. 2022. No. 1. P. 2–11. EDN: VUCKZO. (In Russ.).
9. NUMECA. URL: <https://www.numeca.de/en/products-design-optimisation/> (accessed: 27.09.2023). (In Engl.).
10. Khasanov N. G., Dubinin E. V., Khusnutdinov I. F., Lunev A. T. Chislennoye modelirovaniye kharakteristik tsentrobezhnykh kompressorov i turbin v AO «NIIturbokompressor im. V. B. Shneppa» [Centrifugal compressor and turbines numerical performance modeling in JSC «NIIturbocompressor»] // Kompessornaya tekhnika i pnevmatika. *Compressor and Pneumatics*. 2023. No. 2. P. 28–31. EDN: PSHWBG. (In Russ.).
11. Khasanov N. G., Khusnutdinov I. F., Murtazin R. F., Dubinin E. V. Raschetno-eksperimental'noye issledovaniye vysokoraskhodnoy model'noy stupeni tsentrobezhnogo kompressora s povyshennym vtulochnym otnosheniyem [Numerical and experimental study of a high flow centrifugal compressor master stage with a high hub to tip ratio] // Kompessornaya tekhnika i pnevmatika. *Compressor and Pneumatics*. 2022. No. 4. P. 37–39. EDN: DKVXSf. (In Russ.).
12. Lunev A. T. Razrabotka vysokoeffektivnykh smennykh protochnykh chastey tsentrobezhnykh kompressorov gazoperekachivayushchikh agregatov [Development of highly efficient replaceable flow parts for centrifugal compressors of gas pumping units]. Kazan, 2005. 16 p. (In Russ.).

DUBININ Evgeniy Vladimirovich, Chief of Bureau,
NIIturbokompressor JSC, Kazan.
Correspondence address: evgeniy.dubinin@niitk.ru

IDIYATULLIN Bulat Fanisovich, 2nd Category Engineer for Calculations and Modes, NIIturbokompressor JSC, Kazan.

Correspondence address: Bulat.Idiatullin@niitk.ru

KHASANOV Nariman Gayazovich, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, NIIturbokompressor JSC, Kazan.

SPIN-code: 7765-5764

AuthorID (RSCI): 898713

Correspondence address: Nariman.Khasanov@niitk.ru

For citations

Dubinin E. V., Idiyatullin B. F., Khasanov N. G. Optimization of centrifugal compressor stages // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2023. Vol. 7, no. 4. P. 33 – 39. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-33-39.

Received September 28, 2023.

© **E. V. Dubinin, B. F. Idiyatullin,
N. G. Khasanov**



МЕТОД ОЦЕНКИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛЫХ ОСЕВЫХ ГИДРОТУРБИН

Д. В. Мылкин, А. В. Волков, Б. М. Орахелашвили,
А. А. Дружинин, В. Ю. Ляпин

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1

В статье рассматривается метод проектирования лопастной системы гидротурбины. Предлагаемая методика основывается на разработке обобщенного поэтапного метода, включающего проектирование скелетной поверхности лопасти осевой микрогидротурбины, и последующего исследования эффективности рабочего колеса. Методика опирается на современные методы исследований и сопровождается полным циклом проектирования: от задания начальных условий до создания 3D-модели рабочих органов гидротурбины. Разработанный алгоритм проектирования позволяет добиться упрощения и ускорения процесса проектирования малых гидротурбин. В заключение представлены прикладное применение и направления возможного совершенствования данной методики.

Ключевые слова: микрогидротурбина, скелет лопасти, рабочее колесо гидротурбины, проектирование и оптимизация микроГЭС.

Постановка задачи исследования

Энергоснабжение удаленных районов и по сей день остается сложной технической и социальной проблемой. Строительство ЛЭП для обеспечения энергией таких районов является неоправданно дорогостоящим. Решением обозначенной проблемы может стать локальная генерация на базе местных источников электроэнергии, в том числе построенных с использованием гидравлической мощности [1, 2]. К сожалению, широкому внедрению объектов малой гидроэнергетики препятствует отсутствие серийного производства микрогидротурбин.

Следует отметить, что проектирование станций малой мощности по объему и номенклатуре работ существенно отличается от процесса проектирования крупных ГЭС.

Задача проектирования гидротурбин относится к обратной задаче гидродинамики турбин и заключается в нахождении формы проточной части гидротурбин (ГТ), удовлетворяющей показателям качества на заданных режимах работы. К таким показателям относят энергетические, прочностные, кавитационные, технологические и др.

В современном мире проектирование внутренних компонентов гидромашин осуществляется с помощью специализированного программного обеспечения, использующего различные методы разработки, включая анализ потока и потери энергии в лопастных гидротурбинах [3–6]. Это позволяет упростить поиск Парето-оптимальных решений для заданных параметров, определяющих конкурентоспособность гидротурбины, а также условия ее эксплуатации.

Среди наиболее часто используемых методов проектирования лопастных систем осевых гидротурбин можно выделить следующие [7–10]:

— струйный метод заключается в расчете линий потока и скоростей вдоль них, а также в задании

проектировщиком закона циркуляции потока вдоль скелетной линии на каждой поверхности тока;

— метод распределенного вихря предусматривает проектирование лопасти как единого целого в потенциальном потоке с образованием вихревой поверхности;

— геометрический подход определяет форму скелетной линии на поверхности тока с помощью полинома или других геометрических зависимостей.

Достоинством данных методов является сравнительно небольшие трудозатраты на получение некоторой исходной геометрии лопасти рабочего колеса. Однако данные расчеты носят приближенный характер, в связи с чем потребуются дальнейшая оптимизация скелета лопасти и верификация полученных данных с проведением численных и физических экспериментов. Также можно выделить ещё два важных недостатка, свойственных данным методам:

1) нет явной связи между тем, насколько полученная геометрия соответствует оптимальным энергетическим характеристикам гидротурбины;

2) в каком диапазоне возможно дальнейшее повышение выходных показателей гидротурбины.

Например, несмотря на внешнюю простоту проточного тракта осевой ГТ [11–13], для обеспечения высоких энергетических показателей, лопасть рабочего колеса (РК) должна быть профилированной — иметь пространственную форму. Это значительно повышает трудоёмкость, связанную с проектированием РК. Современные программные комплексы позволяют провести расчет лопастных систем любой сложности. Тем не менее для сокращения времени проектирования разработка упрощенной методики создания исходного приближения скелетных линий лопастей является актуальной задачей.

Для проектирования гидротурбины, прежде всего, необходимо задать расчетный напор H_p и выход-

ную мощность агрегата N . Опыт создания осевых капсульных гидротурбин [11–13] показывает, что величина оптимального приведенного расхода Q'_{opt} составляет $2,0–2,2 \text{ м}^{1/2}/\text{с}$, а оптимальная приведенная частота n'_{opt} лежит в диапазоне $150–160 \text{ м}^{1/2}/\text{с}$.

Данные диапазоны позволяют определить предварительный диаметр рабочего колеса по выражению (1):

$$D = \left(\frac{N}{g \cdot Q'_{opt} \cdot \rho \cdot \eta \cdot H_p^{1.5}} \right)^{0.5}, \quad (1)$$

где D — диаметр рабочего колеса натурной гидротурбины, м;

g — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$;

ρ — плотность воды, $\rho = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$;

η — приблизительный КПД гидротурбины.

Поскольку не существует единого стандарта на ряд диаметров рабочих колес малых гидротурбин, то нет необходимости приводить его к стандартным значениям.

Частоту вращения можно оценить из выражения (2):

$$n = \frac{n'_{opt} \cdot H_p^{0.5}}{D}. \quad (2)$$

В большинстве случаев прямой механической связи гидротурбины с генератором осуществить нельзя в связи с отсутствием генераторов малой мощности с частотой вращения менее $1500 \text{ об}/\text{мин}$. Следовательно, нет необходимости выхода на синхронную частоту вращения.

Из опыта проектирования гидротурбин [12–13] следует назначать величину втулочного отношения $\bar{d}_{вт} = \frac{d_{вт}}{D}$ в диапазоне $(0,4 \dots 0,6)$, где $d_{вт}$ диаметр втулочной цилиндрической поверхности гидротурбины. При этом большие значения применять не рекомендуется, т.к. они могут ухудшать антикавитационные качества гидротурбины, а малые значения соответствуют втулочному профилю большой кривизны, что приводит к значительному увеличению потерь.

Постановка задачи проектирования

С целью верификации методики используется РК осевого типа (турбина Каплана) [12–13]. Согласно особенностям эксплуатации таких гидроагрегатов малой мощности, она конструируется под условия осевого подвода рабочей среды, что делает невозможным применение радиального направляющего аппарата (НА) перед рабочим колесом. Ключевое различие радиального и осевого направляющих аппаратов состоит в том, что радиальный НА создает перед рабочим колесом постоянную циркуляцию скорости, а в осевом НА при постоянной форме лопатки создается переменная циркуляция на входе в РК.

Метод расчета выходных параметров потока из НА приведен в [14]. Показано, что величина циркуляции скорости потока, сформированного цилиндрическими лопатками с постоянной шириной по размаху, существенно и линейно уменьшается к втулочной поверхности, а общая формула циркуляции скорости, создаваемой направляющим аппаратом $\Gamma_{н.а.}$, представлена в выражении (3):

$$\Gamma_{н.а.} = i_{н.а.} \cdot Q, \quad (3)$$

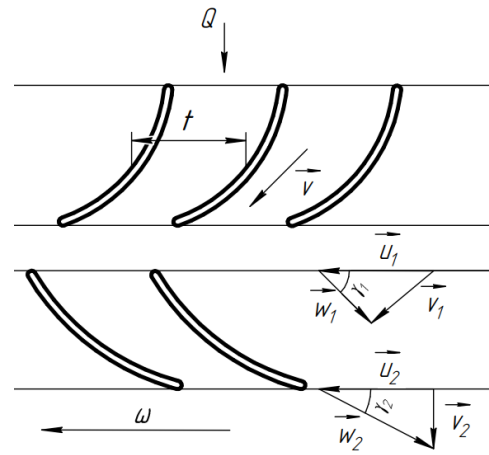


Рис. 1. Обтекание осевой гидротурбины с неподвижным цилиндрическим направляющим аппаратом

Fig. 1. Flow around an axial hydraulic turbine with a fixed cylindrical guide vane

где Q — расход воды через гидротурбину, $\text{м}^3/\text{с}$; $i_{н.а.}$ — размерный параметр $[1/\text{м}]$, определяется для каждой цилиндрической поверхности по формуле (4):

$$i_{н.а.} = r_i \frac{2\pi(1 - k_i)}{F_{н.а.}} \tan \lambda_0, \quad (4)$$

где r_i — радиус цилиндрической поверхности, на которой рассчитывается параметр, м;

k_i — коэффициент прозрачности решетки рабочего колеса;

$F_{н.а.}$ — площадь поперечного сечения проточной части направляющего аппарата, м^2 ;

λ_0 — угол бесциркуляционного обтекания, $^\circ$.

Лопастная система осевого рабочего колеса проектируется в виде набора цилиндрических сечений, образующих прямые движущиеся решетки лопастей [2, 15]. Они представляют собой развёртку цилиндрической поверхности, включающей в себя равноудалённые друг от друга на величину шага решетки t , лопасти рабочего колеса. На рис. 1 представлена схема обтекания гидротурбины с неподвижным цилиндрическим направляющим аппаратом.

Из предшествующего опыта следует задать меридианную проекцию лопасти, её форму в плане и значения густоты решетки для каждого расчетного сечения.

Выходную кромку лопасти можно располагать в меридианной плоскости. Для определения скелетов профилей и дальнейшего профилирования рабочего колеса необходимо построить треугольники скоростей на входе и на выходе РК для каждой цилиндрической поверхности.

Предполагается, что входной элемент скелета профиля соответствует безударному входу потока на расчетном режиме, а выходной элемент скелета — обеспечивает отсутствие циркуляции после РК.

Меридианная составляющая абсолютной скорости V_{mi} $[\text{м}/\text{с}]$ определяется по формуле (5):

$$V_{mi} = \frac{4Q}{\pi(D^2 - d_{вт}^2)}, \quad (5)$$

Переносная (окружная) скорость U_i [м/с] определяется по формуле (6):

$$U_i = \omega \cdot r_i, \quad (6)$$

где ω — угловая частота вращения вала гидротурбины, рад/с.

Окружная составляющая абсолютной скорости на входе V_{u1} [м/с] при отсутствии циркуляции потока на выходе $\Gamma_2 = 0$ рассчитана из выражения (7):

$$V_{u1} = \frac{g \cdot H_T}{U_{1i}}, \quad (7)$$

где H_T — теоретический напор гидротурбины, м.

Величина теоретического напора определяется из расчетного напора согласно выражению (8):

$$H_T = H_p \cdot \eta_r, \quad (8)$$

где η_r — гидравлический КПД гидротурбины.

Далее, по выражениям (9), необходимо определить углы относительных скоростей на входе и выходе лопастной системы на расчетных цилиндрических сечениях.

Соответственно,

$$\begin{cases} \gamma_{1u_i} = \arctan \frac{V_{m_i}}{U_i - V_{u1i}} \\ \gamma_{2u_i} = \arctan \frac{V_{m_i}}{U_i - V_{u2i}} \end{cases} \quad (9)$$

С учетом влияния небольшого количества лопастей и в связи с формированием пограничного слоя при работе на реальных жидкостях следует уменьшить угол установки лопасти на выходе γ_{2u_i} на $2-4^\circ$.

На основании полученных углов строится скелет профиля в виде пересекающихся лучей. При этом точку пересечения следует располагать вблизи середины скелета. Для этого в определенных случаях требуется изменять углы охвата профилей в плане соответствующих сечений, сохраняя плавность входной кромки. Вследствие малой кривизны профиля скелет представлен в виде дуги окружности радиуса R , касательной к линиям лучей на входной и выходной кромках и заданной длиной хорды L .

Для дальнейшего определения геометрических параметров будущего скелета лопасти вводится локальная система координат с центром в точке E (центр дуги окружности). Для неё можно определить координаты точек дуги, соответствующих входной и выходной кромке РК (рис. 2).

$$x_a = R \cos \gamma_1; \quad y_a = R \sin \gamma_1;$$

$$x_c = R \cos \gamma_2; \quad y_c = R \sin \gamma_2.$$

Зная координаты крайних точек дуги окружности, по выражению (10) можно найти длину хорды:

$$L = \sqrt{(x_a - x_c)^2 + (y_a - y_c)^2} = R \sqrt{2(1 - \cos \Psi)}, \quad (10)$$

где Ψ — угол охвата лопасти РК, $^\circ$.

Для определения угла бесциркуляционного обтекания λ_0 полученной дуги проводится луч из точки C , проходящий через центр дуги (т. B). Её координаты

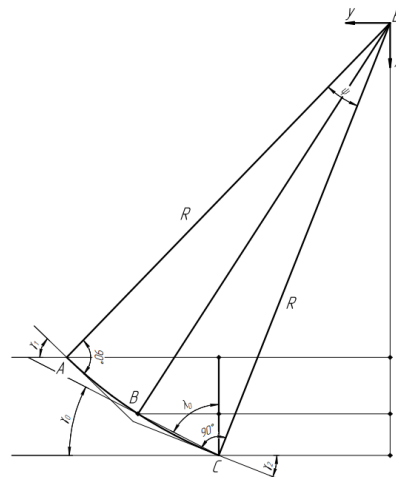


Рис. 2. Схема определения параметров сечения лопасти РК

Fig. 2. Scheme for determining the parameters of the impeller blade section

находятся из локальной системы координат по выражению (11):

$$\begin{cases} x_b = R \cos \left(\frac{\Psi}{2} + \gamma_2 \right) \\ y_b = R \sin \left(\frac{\Psi}{2} + \gamma_2 \right) \end{cases} \quad (11)$$

Определив координаты точки B , по формуле (12) можно найти угол установки эквивалентной пластины γ_0 , соответствующий сумме: $\gamma_0 + \lambda_0 = 90^\circ$.

$$\tan \gamma_0 = \frac{x_b - x_c}{y_b - y_c} = -\tan \left(\frac{3\gamma_2 + \gamma_1}{4} \right). \quad (12)$$

Отсюда значение угла бесциркуляционного обтекания определяется выражением (13):

$$\lambda_0 = \frac{3\gamma_2 + \gamma_1}{4} - 90^\circ (< 0). \quad (13)$$

Коэффициент прозрачности решетки дужек окружности определяется по номограммам $k = f(\gamma; l/t)$ для решетки эквивалентных пластин [15].

Фактическая циркуляционная составляющая скорости на выходе V_{u2i} [м/с] из рабочего колеса по расчетным сечениям определяется из уравнения связи циркуляций (14) в виде:

$$V_{u2i} = k \cdot V_{u1i} + (1 - k) \tan \lambda_{0i} V_m + (1 - k) U_i. \quad (14)$$

Для каждого расчетного сечения вычисляется зависимость теоретического напора от расхода.

Причем нахождение точки пересечения напорной характеристики с осью ординат и определение теоретического напора в расчетном режиме проводится согласно выражению (15):

$$\begin{cases} H_{T0} = -(1 - k) \cdot \frac{U^2}{g} \\ H_{Tp} = (\Gamma_1 - \Gamma_2) \cdot \frac{\omega}{2\pi g} \end{cases} \quad (15)$$

Таблица 1. Расчетные параметры лопасти НА
Table 1. Design parameters of the GV blade

НА		r	V_m	γ_0	$\tan\lambda_0$	l/t	k	$i_{н.а}$	$\Gamma_{н.а}$
$Q = 1,6 \text{ м}^3/\text{с}$		м	м/с	град				1/м	$\text{м}^2/\text{с}$
$b = 145 \text{ мм}$	втулка	0,120	6,74	25,4	0,475	1,815	0,003	1,503	2,404
$R = 260 \text{ мм}$	средняя	0,228	6,74	25,4	0,475	0,953	0,051	2,723	4,357
$Z_{НА} = 9$	периф.	0,300	6,74	25,4	0,475	0,726	0,110	3,354	5,366

Таблица 2. Гидродинамические параметры лопасти РК
Table 2. Hydrodynamic parameters of the impeller blade

	r	U	V_m	V_{ul}	γ_1 пот.	γ_2 пот.	γ_2 лоп.	$\tan\lambda_0$	l/t	k
	м	м/с	м/с	м/с	град	град	град			
Втулка	0,120	7,54	6,74	3,19	57,2	41,8	36,8	-1,11	1,10	0,034
Средняя	0,228	14,36	6,74	3,04	30,8	25,1	23,1	-2,14	1,00	0,062
Периф.	0,300	18,85	6,74	2,85	22,8	19,7	18,2	-2,85	0,90	0,131

Желательно при расчетном расходе получить близкие значения теоретического напора по всем поверхностям. Далее рассчитывается значение циркуляции скорости на лопасти, величина и направление $\gamma_{\text{ср}}$ средне-векторной относительной скорости $W_{\text{ср}}$ и по выражениям (16) вычисляется величина гидравлической силы R и её окружная составляющая R_u .

$$\begin{cases} R = \rho \cdot \Gamma_{\text{лоп}} \cdot W_{\text{ср}} \\ R_u = R \cdot \sin\gamma_{\text{ср}} \end{cases} \quad (16)$$

По полученным значениям, согласно выражению (17), вычисляются удельные моменты относительно оси вращения по расчетным сечениям:

$$M_i = R_u \cdot r_i. \quad (17)$$

Далее, при интегрировании значений удельных моментов по размаху лопасти, получается интегральная оценка момента.

Характеристика мощности получается из выражения (18).

$$N = M_z \cdot \omega. \quad (18)$$

Апробация методики

Для верификации представленного метода проведем проектирование и расчёт теоретических характеристик гидротурбины на примере рабочего колеса на следующие рабочие параметры:

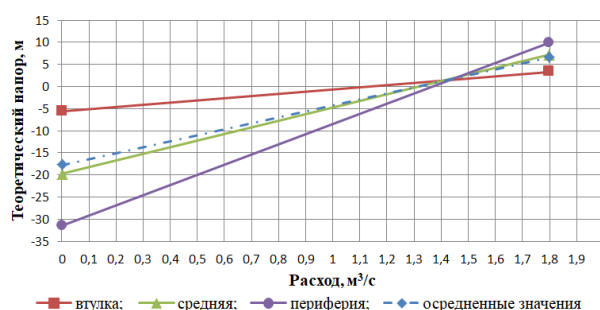
$$Q = 1,6 \text{ м}^3/\text{с}, H_p = 4,5 \text{ м}, n = 600 \text{ об/мин.}$$

Геометрические параметры РК:

$$D = 600 \text{ мм}, d_{\text{вт}} = 240 \text{ мм.}$$

Результаты расчета геометрических и гидродинамических параметров НА для трех характерных сечений приведены в табл. 1.

Предварительно задав меридианную проекцию РК, в соответствии с полученными результатами выполняется профилирование лопастной системы.

Рис. 3. Зависимость теоретического напора сечений от расхода
Fig. 3. Dependence of theoretical head of sections on flow rateТаблица 3. Интегральные показатели гидротурбины
Table 3. Integral indicators of a hydraulic turbine

Q	H_t	M_t	N_t
$\text{м}^3/\text{с}$	м	$\text{кН} \cdot \text{м}$	кВт
1,20	-1,75	-0,26	-16,62
1,30	-0,31	0,01	0,89
1,40	1,12	0,34	21,32
1,50	2,55	0,71	44,65
1,60	3,98	1,13	70,89
1,70	5,41	1,59	100,03
1,80	6,84	2,10	132,08

Предполагается, что циркуляция на выходе из РК должна быть равна 0.

В табл. 2 представлены результаты расчёта параметров потока для проектируемого РК.

Полученные значения позволяют построить зависимости теоретического напора для каждого из расчетных сечений и провести их осреднение по размаху лопасти (рис. 3).

Результаты расчётов показывают, что отдельные профили работают наиболее согласованно по напору при расходе $Q = 1,45 \text{ м}^3/\text{с}$. Хуже всего работает

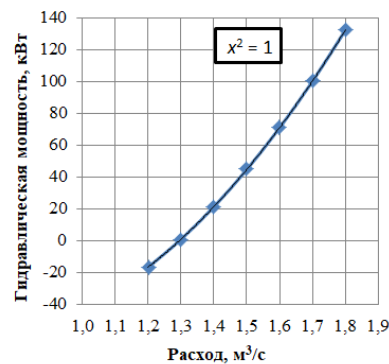
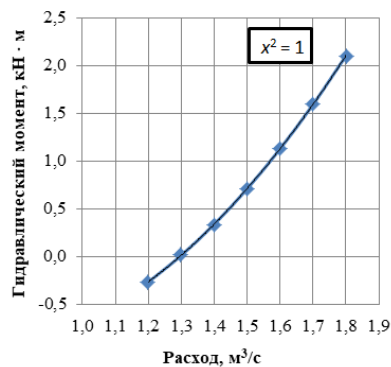


Рис. 4. Теоретические характеристики гидротурбины при постоянной частоте вращения $n = 600$ об/мин

Fig. 4. Theoretical characteristics of a hydraulic turbine at a constant speed $n = 600$ rpm

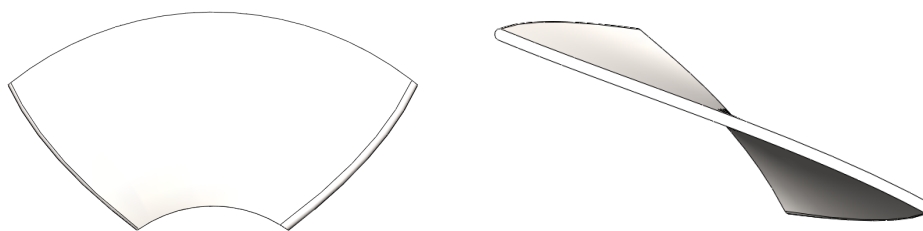


Рис. 5. Внешний вид лопасти, образованной в результате проектирования

Fig. 5. Appearance of the blade formed as a result of the design

втулочный профиль. Это объясняется тем, что создаваемая НА циркуляция скорости в этом сечении недостаточна, предпочтительнее использовать лопастки НА переменной ширины.

Результаты расчета интегральных значений гидравлического момента и мощности приведены в табл. 3 и на рис. 4.

Аппроксимация полученных результатов полиномом второй степени имеет степень достоверности результатов $x^2 = 1$, что говорит о полном соответствии характера полученных кривых теоретическим данным.

При расходах менее $Q = 1,3$ м³/с наблюдается тормозной режим, нормальная работа гидравлической машины в турбинном режиме при данных значениях расхода невозможна и для поддержания постоянной частоты вращения необходим дополнительный внешний источник механической энергии.

По изложенной методике проектирования плавным соединением скелетов профилей трёх поверхностей образуется лопасть, представленная на рис. 5.

Заключение

Проведенное исследование подтверждает работоспособность предлагаемой методики оценки прогнозных теоретических характеристик осевой гидротурбины на этапе предварительного проектирования. Сравнение характеристик теоретического напора на отдельных расчетных поверхностях позволяет провести необходимые коррекции для их согласованной работы.

Практическое применение данного метода проектирования может служить хорошим первым приближением для оценки формы лопасти рабочего колеса гидротурбины и построение её теоретических характеристик по известным параметрам станции.

Данный подход может быть востребован как при проектировании новых малых гидроэлектростанций, так и при определении эффективных параметров гидротурбин при замене устаревших агрегатов.

Безусловно, данная методика в дальнейшем будет корректироваться и совершенствоваться на основе результатов экспериментальных исследований.

Благодарность

Результаты получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения Государственного задания № FSWF-2022-0008, вступившего в силу в соответствии с Соглашением № 075-03-2022-138/5 от 02.11.2022.

Список источников

1. Люкайтис В. Ю., Глушков С. Ю. Автономные энергокомплексы, гибридные конструкции с применением возобновляемых источников энергии // Силовое и энергетическое оборудование. Автономные системы. 2019. Т. 2, вып. 2. С. 111–120. DOI: 10.32464/2618-8716-2019-2-2-111-120.
2. Дружинин А. А., Парыгин А. Г., Волков А. В. [и др.]. К вопросу о совершенствовании элементов проточной части малых и микрогидротурбин для автономных энергоисточников // Насосы. Турбины. Системы. 2018. № 3 (28). С. 62–75. EDN: YUJVVB.
3. Abdul M., Priyono S., Aryadi S. [et al.]. Design Optimization of Axial Hydraulic Turbine for Very Low Head Application // Energy Procedia. 2015. Vol. 68. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.03.255.
4. Chen J., Engeda A. Standard module hydraulic technology: A novel geometrical design methodology and analysis for a low-head hydraulic turbine system, Part I: General design methodology

and basic geometry considerations // Energy. 2020. Vol. 196. 117151. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117151.

5. Ильичев В. Ю., Юрик Е. А., Трутнев Д. С. Обобщённая методика автоматизированного проектирования обратимых гидротурбин // Научное обозрение. Технические науки. 2019. № 5. С. 5–10. EDN: UXNGNJ.

6. Жарковский А. А., Щур В. А., Омран М. [и др.]. Автоматизация проектирования рабочего колеса радиально-осевой гидротурбины // Известия МГТУ «МАМИ». 2021. № 4 (50). С. 18–26. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-50-4-18-26.

7. Банников Д. В., Черный С. Г., Чирков Д. В. [и др.]. Оптимизационное проектирование формы проточной части гидротурбины и анализ течения в ней // Вычислительные технологии. 2010. Т. 15, № 4. С. 73–94.

8. Астракова А. С., Банников Д. В., Чёрный С. Г. [и др.]. Численные методы оптимизационного проектирования проточных частей гидротурбин // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19, № 1. С. 20–39. EDN: RYUNAH.

9. Лобарева И. Ф., Скороспелов В. А., Турук П. А. [и др.]. Об одном подходе к оптимизации формы лопасти гидротурбины // Вычислительные технологии. 2005. Т. 10, № 6. С. 52–74. EDN: KWZJBH.

10. Xia X., Luo H., Li S. [et al.]. Characteristics and factors of mode families of axial turbine runner // International Journal of Mechanical Sciences. 2023. Vol. 251. 108356. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2023.108356.

11. ОСТ 108.023.107-85. Турбины гидравлические горизонтальные капсульные. Введ. 01–01–1986. Москва, 1986. 38 с.

12. Барлит В. В. Гидравлические турбины. Киев: Вища школа, 1977. 360 с.

13. Ковалёв Н. Н. Гидротурбины: Конструкции и вопросы проектирования. 2-е изд., доп. и перераб. Ленинград: Машиностроение, 1971. 584 с.

14. Ермаков И. Н., Орахелашвили Б. М., Лямасов А. К. [и др.]. Математическое моделирование рабочих органов осевой гидротурбины малой ГЭС // Гидравлика. 2022. № 15. С. 1–12. EDN: UUTINO.

15. Викторов Г. В. Гидродинамическая теория решеток. Москва: Высшая школа, 1969. 368 с.

МЫЛКИН Дмитрий Васильевич, аспирант кафедры гидромеханики и гидравлических машин им. В. С. Квятковского, младший научный сотрудник лаборатории микроГЭС (120012) Национального исследовательского университета «МЭИ» (НИУ «МЭИ»), г. Москва.

SPIN-код: 8304-9535

AuthorID (РИНЦ): 1176114

Адрес для переписки: MylkinDV@mpei.ru

ВОЛКОВ Александр Викторович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой гидромеханики и гидравлических машин им. В. С. Квятковского НИУ «МЭИ», г. Москва.

SPIN-код: 3022-2171

AuthorID (РИНЦ): 726099

ResearcherID: A-6919-2014

AuthorID (SCOPUS): 56900509700

Адрес для переписки: VolkovAV@mpei.ru

ОРАХЕЛАШВИЛИ Баграт Мерабович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры гидромеханики и гидравлических машин им. В. С. Квятковского, ведущий научный сотрудник лаборатории микроГЭС (120012) НИУ «МЭИ», г. Москва.

AuthorID (РИНЦ): 400750

AuthorID (SCOPUS): 6506150907

Адрес для переписки: OrakhelashvBM@mpei.ru

ДРУЖИНИН Алексей Анатольевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры гидромеханики и гидравлических машин им. В. С. Квятковского, заведующий лабораторией микроГЭС (120012) НИУ «МЭИ», г. Москва.

SPIN-код: 8488-6471

AuthorID (РИНЦ): 843020

ORCID: 0000-0001-9198-9253

AuthorID (SCOPUS): 57192078235

Адрес для переписки: DruzhininAA@mpei.ru

ЛЯПИН Валерий Юрьевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры гидромеханики и гидравлических машин им. В. С. Квятковского, ведущий научный сотрудник лаборатории микроГЭС (120012) НИУ «МЭИ», г. Москва.

SPIN-код: 1675-0187

AuthorID (РИНЦ): 372692

Адрес для переписки: LiapinVY@mpei.ru

Для цитирования

Мылкин Д. В., Волков А. В., Орахелашвили Б. М., Дружинин А. А., Ляпин В. Ю. Метод оценки теоретических характеристик малых осевых гидротурбин // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 4. С. 40–47. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-40-47.

Статья поступила в редакцию 10.10.2023 г.

© Д. В. Мылкин, А. В. Волков, Б. М. Орахелашвили,

А. А. Дружинин, В. Ю. Ляпин



METHOD FOR ASSESSING THE THEORETICAL CHARACTERISTICS OF SMALL AXIAL HYDRAULIC TURBINES

D. V. Mylkin, A. V. Volkov, B. M. Orakhelashvili, A. A. Druzhinin, V. Yu. Lyapin

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14, bld. 1, 111250

Energy supply to remote areas remains a technical and social challenge. Construction of transmission lines to provide electricity to such areas is expensive and not always possible. One of the promising areas in this area is local energy generation based on local resources, in particular small watercourses, using small hydroelectric power plants.

Small hydroelectric power plants are small hydropower facilities that use the energy of small watercourses to generate electricity. They have a number of advantages over traditional energy sources, such as environmental friendliness, low operating costs and high efficiency.

However, the widespread introduction of small hydroelectric power plants is hampered by the lack of mass production of small hydraulic turbines and difficulties in designing low-power plants. Designing hydraulic turbines is a complex task that requires solving the inverse problem of hydrodynamics and finding the optimal shape of the flow path.

To simplify the design of hydraulic turbines in the modern world, specialized software is used using various methods, including flow analysis, energy loss and blade shape optimization.

This article based on an analysis of existing methods for designing and using a mathematical model of a hydraulic turbine with simplified blades, proposes a method for designing and analyzing the theoretical characteristics of the resulting hydraulic turbine.

In conclusion, taking into account the use of the methodology for designing a hydraulic turbine for given parameters, its assessment is given, as well as ways to possibly improve the accuracy of the results obtained. Possible areas of application of the outlined design methodology are indicated.

Keywords: microhydroturbine, blade skeleton, hydraulic turbine impeller, design and optimization of microhydroelectric power station.

Acknowledgements

The results are obtained with the financial support of the Russian Ministry of Science and Higher Education under the State Assignment No. FSWF-2022-0008, entered into force in accordance with Agreement No. 075-03-2022-138/5 of 02.11.2022.

References

1. Lyukaytis V. Yu., Glushkov S. Yu. Avtonomnyye energokompleksy, gibridnyye konstruktssii s primeneniym vozobnovlyayemykh istochnikov energii [Autonomous power generation facilities, hybrid structures comprising renewable energy sources] // Silovoye i energeticheskoye oborudovaniye. Avtonomnyye sistemy. *Power and Energy Equipment. Autonomous Systems*. 2019. Vol. 2, Issue 2. P. 111–120. DOI: 10.32464/2618-8716-2019-2-2-111-120. (In Russ.).
2. Druzhinin A. A., Parygin A. G., Volkov A. V. [et al.]. K voprosu o sovershenstvovanii elementov protochnoy chasti malykh i mikrogidroturbin dlya avtonomnykh energoistovnikov [To the question of the flow part elements perfection of small and micro hydroturbines for autonomous energy sources] // Nasosy. Turbiny. Sistemy. *Pumps. Turbines. Systems*. 2018. No. 3 (28). P. 62–75. EDN: YUJVB. (In Russ.).
3. Abdul M., Priyono S., Aryadi S. [et al.]. Design Optimization of Axial Hydraulic Turbine for Very Low Head Application // *Energy Procedia*. 2015. Vol. 68. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.03.255. (In Engl.).
4. Chen J., Engeda A. Standard module hydraulic technology: A novel geometrical design methodology and analysis for a low-head hydraulic turbine system, Part I: General design methodology and basic geometry considerations // *Energy*. 2020. Vol. 196. 117151. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117151. (In Engl.).
5. Il'ichev V. Yu., Yurik E. A., Trutnev D. S. Obobshchennaya metodika avtomatizirovannogo proyektirovaniya obratimnykh gidroturbin [The generalized technique of automated design of reversible water-wheels] // *Nauchnoye obozreniye. Tekhnicheskiye nauki. Scientific Review. Technical Science*. 2019. No. 5. P. 5–10. EDN: UXNGNJ. (In Russ.).
6. Zharkovskiy A. A., Shchur V. A., Omran M. [et al.]. Avtomatizatsiya proyektirovaniya rabochego koleasa radial'no-osevoy gidroturbiny [Automation of the design of the impeller of a radial-axial hydraulic turbine] // *Izvestiya MG TU «MAMI»*. *Izvestiya MG TU MAMI*. 2021. No. 4 (50). P. 18–26. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-50-4-18-26. (In Russ.).
7. Bannikov D. V., Chernyy S. G., Chirkov D. V. [et al.]. Optimizatsionnoye proyektirovaniye formy protochnoy chasti gidroturbiny i analiz techeniya v ney [Optimization design of the shape of the flow part of a hydraulic turbine and analysis of the flow in it] // *Vychislitel'nyye tekhnologii. Computer Technology*. 2010. Vol. 15, no. 4. P. 73–94. (In Russ.).
8. Astrakova A. S., Bannikov D. V., Chernyy S. G. [et al.]. Chislennyye metody optimizatsionnogo proyektirovaniya protochnykh chastey gidroturbin [Numerical methods for optimization design of hydraulic turbine flow parts] // *Vychislitel'nyye tekhnologii. Computer Technology*. 2014. Vol. 19, no. 1. P. 20–39. EDN: RYYHAH. (In Russ.).

9. Lobareva I. F., Skorospelov V. A., Turuk P. A. [et al.]. Ob odnom podkhode k optimizatsii formy lopasti gidroturbiny [On one approach to optimizing the shape of a hydraulic turbine blade] // Vychislitel'nyye tekhnologii. *Computer Technology*. 2005. Vol. 10, no. 6. P. 52–74. EDN: KWZJBH. (In Russ.).

10. Xia X., Luo H., Li S. [et al.]. Characteristics and factors of mode families of axial turbine runner // International Journal of Mechanical Sciences. 2023. Vol. 251. 108356. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2023.108356. (In Engl.).

11. OST 108.023.107-85. Turbiny gidravlicheskiye gorizonta'nyye kapsul'nyye [Hydraulic horizontal capsule turbines]. Moscow, 1986. 38 p. (In Russ.).

12. Barlit V. V. Gidravlicheskiye turbiny [Hydraulic turbines]. Kiev, 1977. 360 p. (In Russ.).

13. Kovalev N. N. Gidroturbiny: Konstruktsii i voprosy proyektirovaniya [Hydroturbines: Structures and design issues]. 2nd ed. Leningrad, 1971. 584 p. (In Russ.).

14. Ermakov I. N., Orakhelashvili B. M., Lyamasov A. K. [et al.]. Matematicheskoye modelirovaniye rabochikh organov osevoy gidroturbiny maloy GES [Mathematical modeling of the working bodies of an axial hydraulic turbine of a small hydroelectric power station] // Gidravlika. *Hydraulics*. 2022. No. 15. P. 1–12. EDN: UUTIHO. (In Russ.).

15. Viktorov G. V. Gidrodinamicheskaya teoriya reshetok [Hydrodynamic theory of lattices]. Moscow, 1969. 368 p. (In Russ.).

MYLKIN Dmitriy Vasilyevich, Graduate Student of Fluid Mechanics and Hydraulic Machines named after V. S. Kvyatkovsky Department, Junior Researcher at the Laboratory of Microhydroelectric Power Plants (120012), National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI), Moscow.

SPIN-code: 8304-9535

AuthorID (RSCI): 1176114

Correspondence address: MylkinDV@mpei.ru

VOLKOV Aleksander Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Fluid Mechanics and Hydraulic Machines named after V. S. Kvyatkovsky Department, National Research University «MPEI», Moscow.

SPIN-code: 3022-2171

AuthorID (RSCI): 726099

ResearcherID: A-6919-2014

AuthorID (SCOPUS): 56900509700

Correspondence address: VolkovAV@mpei.ru

ORAKHELASHVILI Bagrat Merabovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Fluid Mechanics and Hydraulic Machines named after V. S. Kvyatkovsky Department, Leading Researcher at the Laboratory of Microhydroelectric Power Plants (120012), National Research University «MPEI», Moscow.

AuthorID (RSCI): 400750

AuthorID (SCOPUS): 6506150907

Correspondence address: OrakhelashvBM@mpei.ru

DRUZHININ Aleksey Anatolyevich, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Fluid Mechanics and Hydraulic Machines named after V. S. Kvyatkovsky Department, Head of the Microhydroelectric Power Plant Laboratory (120012), National Research University «MPEI», Moscow.

SPIN-code: 8488-6471

AuthorID (RSCI): 843020

ORCID: 0000-0001-9198-9253

AuthorID (SCOPUS): 57192078235

Correspondence address: DruzhininAA@mpei.ru

LYAPIN Valeriy Yuryevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Fluid Mechanics and Hydraulic Machines named after V. S. Kvyatkovsky Department, Leading Researcher at the Laboratory of Microhydroelectric Power Plants (120012), National Research University «MPEI», Moscow.

SPIN-code: 1675-0187

AuthorID (RSCI): 372692

Correspondence address: LiapinVY@mpei.ru

For citations

Mylkin D. V., Volkov A. V., Orakhelashvili B. M., Druzhinin A. A., Lyapin V. Yu. Method for assessing the theoretical characteristics of small axial hydraulic turbines // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2023. Vol. 7, no. 4. P. 40–47. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-40-47.

Received October 10, 2023.

© D. V. Mylkin, A. V. Volkov, B. M. Orakhelashvili,
A. A. Druzhinin, V. Yu. Lyapin



АВТОНОМНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО МИКРОДВИГАТЕЛЯ С ДВУМЯ АВТОНОМНЫМИ НАГРЕВАТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ НАНОСПУТНИКОВ

В. Н. Блинов, В. В. Косицын, А. И. Лукьянчик, П. В. Степень, П. С. Ячменев

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Целью работы является проведение автономных экспериментальных исследований электротермического микродвигателя с двумя автономными нагревательными элементами диаметром 4 мм. В результате экспериментальных исследований микродвигателя определена динамика нагрева конструкции микродвигателя и рабочего тела (изобутана) в диапазоне мощностей от 5 Вт до 60 Вт. Проведенные экспериментальные исследования показали возможность применения предложенной конструкции микродвигателя с двумя автономными нагревательными элементами не только на малых космических аппаратах, но и на микро- и наноспутниках в условиях ограниченной бортовой энергетики.

Ключевые слова: наноспутник, двигательная установка, электротермический микродвигатель, автономные экспериментальные исследования, автономный нагревательный элемент.

Введение

Быстроразвивающимся направлением ракетно-космической техники является создание и применение малых космических аппаратов (МКА), в том числе и наноспутников (НС), для исследования околоземного космического пространства, развития космических технологий, проведения различных экспериментов в космосе [1–5].

Развитие современных НС как в России, так и за рубежом связано с созданием маневрирующих наноспутников (МНС) и создания на их основе маневрирующих орбитальных группировок для решения актуальных прикладных и научных задач [5, 6].

Одной из основных служебных систем МНС является двигательная установка (ДУ) [7–10].

Наиболее эффективными ДУ по критериям надежности, стоимости и времени создания, простоте конструкции, малому энергопотреблению при реализации повышенных значений тяг (до 100 мН) отвечают ДУ с электротермическими (электронагревными) микродвигателями (ЭТМД), успешно используемые в целом ряде малых космических аппаратов (МКА) различной размерности [6, 7, 9, 11].

Среди ЭТМД можно выделить ЭТМД с трубчатым нагревательным элементом (ТНЭ) и ЭТМД с автономным нагревательным элементом (АНЭ) [12].

Основным преимуществом ЭТМД с ТНЭ является возможность резервирования ТНЭ, что резко повышает надежность его функционирования [12]. Однако они обладают существенными недостатками, среди которых можно выделить: сложную и длительную технологию герметизации мест выхода токовыводов и термопар, использование менее энергетически выгодного «холодного» способа запуска (рис. 1а) [12].

ЭТМД с АНЭ позволяет осуществлять как «холодный», так и «горячий» способы запуска (рис. 1б)

[12]. «Горячий» способ запуска позволяет увеличить удельный импульс тяги ЭТМД.

Основным недостатком ЭТМД с АНЭ является отсутствие возможности резервирования нагревательного элемента, что значительно снижает надежность всей ДУ.

Повышение надежности функционирования ЭТМД с АНЭ может быть достигнуто применением двух независимых АНЭ. Наличие двух АНЭ позволяет осуществлять нагрев рабочего тела микродвигателя одним нагревательным элементом, при этом второй находится в резерве, либо использовать оба АНЭ с подачей напряжения на каждый из них в различных комбинациях.

Применение двух АНЭ приводит к разработке нового корпуса ЭТМД, который должен иметь минимальную массу и обеспечивать наибольший теплообмен рабочего тела с горячими поверхностями ЭТМД.

В этой связи актуальной задачей является проведение автономных экспериментальных исследований ЭТМД с двумя АНЭ с целью подтверждения его работоспособности и оценки эффективности.

Постановка задачи исследования

Ставится задача оценки эффективности ЭТМД с двумя АНЭ на основе автономных экспериментальных исследований.

Для решения поставленной задачи:

- разработана 3D модель ЭТМД с двумя АНЭ (основным и резервным);
 - изготовлен корпус опытного образца ЭТМД для двух АНЭ по аддитивной технологии;
 - собран опытный образец ЭТМД с двумя АНЭ.
- Задачами автономных экспериментальных исследований являются:
- экспериментальные исследования ЭТМД с двумя АНЭ в нормальных условиях (атмосфере)

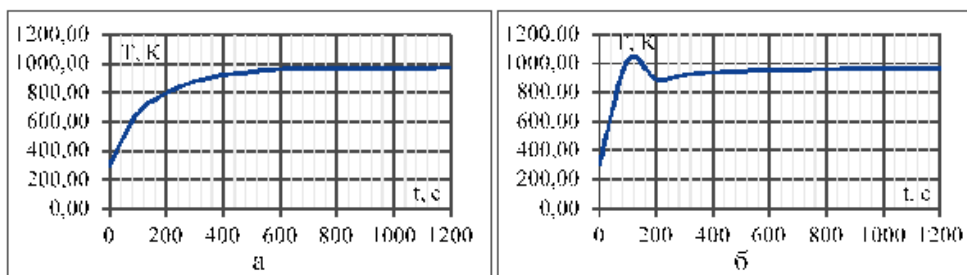


Рис. 1. Зависимость температуры АНЭ ЭТМД от времени нагрева при «холодном» (а) и «горячем» (б) способах запуска ЭТМД

Fig. 1. Dependence of the temperature of the heating element of the resistojet on the heating time for the «cold» (a) and «hot» (b) methods of starting the resistojet

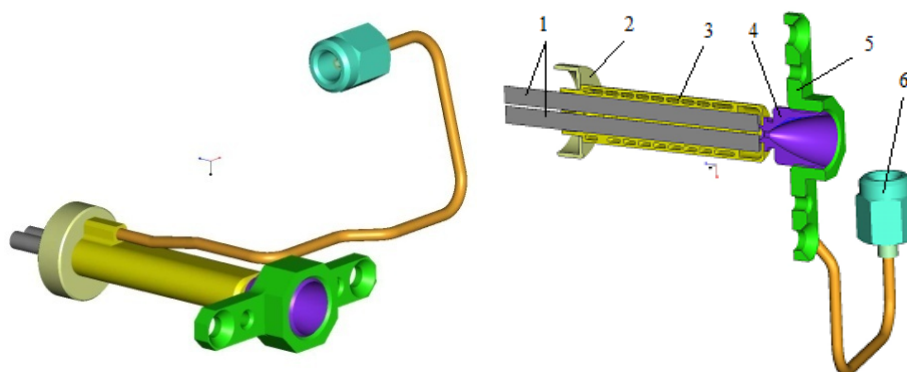


Рис. 2. 3D модель ЭТМД с двумя АНЭ:

1 — АНЭ; 2 — центрирующая опора; 3 — корпус (3D печать); 4 — сопло; 5 — фланец; 6 — подводящий трубопровод

Fig. 2. 3D model of resistojet with two heating elements:

1 — heating element; 2 — centering support; 3 — housing (3D printing); 4 — nozzle; 5 — flange; 6 — supply pipeline

без теплозащиты и с теплозащитой для определения влияния теплозащиты, а также определения максимального времени выхода ЭТМД на квазистационарный режим при «горячем» способе запуска; — экспериментальные исследования ЭТМД с двумя АНЭ в вакуумной камере с подачей рабочего тела для определения динамики нагрева конструкции и определения нагрева рабочего тела в опытном образце ЭТМД с двумя АНЭ.

Теория

Конструкция ЭТМД с двумя АНЭ должна обеспечивать максимальный нагрев рабочего тела (аммиак, изобутан, фреон R134-A и др.) для увеличения удельного импульса тяги микродвигателя. Корпус ЭТМД представляет собой сложную конструкцию с большим количеством каналов газовада, в котором и осуществляется нагрев рабочего тела. Для обеспечения максимального теплообмена рабочего газа с горячими поверхностями микродвигателя его корпус изготовлен по аддитивным технологиям из стали, за счет чего удалось уменьшить толщину стенок каналов газовада (толщина стенок не превышает 0,5 мм), что, в свою очередь, уменьшает общую массу корпуса и позволяет уменьшить теплоемкость корпуса [8, 13–15].

Уменьшение теплоемкости корпуса приводит к увеличению температуры нагрева рабочего тела.

Для повышения надежности ЭТМД в корпусе предусмотрена возможность размещения двух АНЭ, один из которых является резервным. При не-



Рис. 3. ЭТМД с двумя АНЭ и теплозащитой

Fig. 3. Resistojet with two heating elements and thermal protection

обходимости подаваемая мощность на ЭТМД может подаваться как на один АНЭ, так и на оба.

В качестве АНЭ используются трубчатые электронагреватели ТЭНУ с внутренней термпарой, соответствующий ГОСТ 13268-88 [16]. Характеристики АНЭ: номинальная мощность — до 60 Вт; рабочее напряжение — 12 В; диаметр — 4,0 мм; длина — 50 мм; гарантийный ресурс при эксплуатации в газовой среде — 3000 ч.

К корпусу ЭТМД приваривается сопло, на внешней поверхности которого имеется резьба для крепления фланца. Фланец позволяет разместить ЭТМД с двумя АНЭ во внутренней полости топливного бака, тем самым уменьшая общие габариты КДУ.

Конструкция ЭТМД с двумя АНЭ представлена на рис. 2.

Для снижения тепловых потерь корпуса ЭТМД с двумя АНЭ по аналогии с экспериментальными

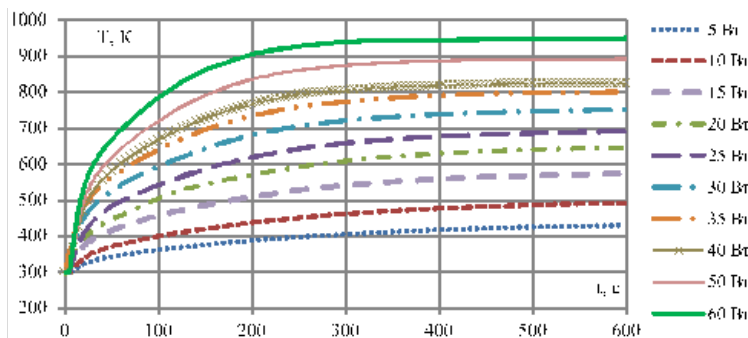


Рис. 4. Результаты экспериментальных исследований ЭТМД с двумя АНЭ на воздухе без теплозащиты

Fig. 4. Results of experimental studies of resistojet with two heating elements in air without thermal protection

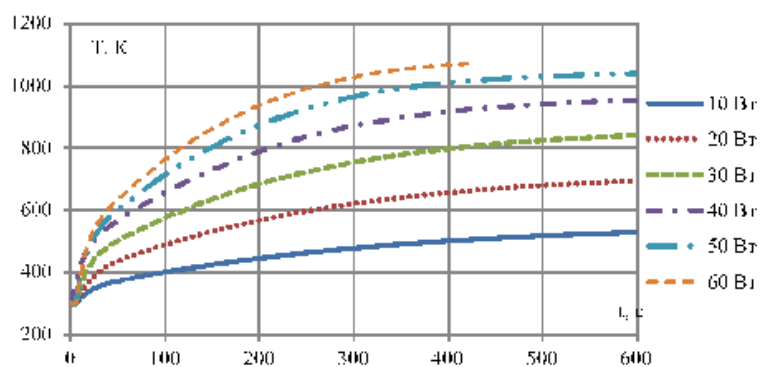


Рис. 5. Результаты экспериментальных исследований ЭТМД с двумя АНЭ на воздухе с теплозащитой

Fig. 5. Results of experimental studies of resistojet with two heating elements in air with thermal protection

исследования ЭТМД с АНЭ диаметром 6 мм использована многослойная теплозащита в составе: ткань ХВК-0.05, фольга, сплав ИВЗВ, 8 мкм.

В соответствии с рис. 3 представлен изготовленный ЭТМД с двумя АНЭ.

Для определения максимального времени выхода ЭТМД на квазистационарный режим при «горячем» способе запуска предложена методика экспериментальных исследований ЭТМД с двумя АНЭ в нормальных условиях (атмосфере), которая включает в себя:

- подключение АНЭ ЭТМД к источнику питания, подключение внутренней термопары АНЭ к многоканальному измерителю температуры (МИТ-8);

- подача мощности на АНЭ от 10 Вт до 60 Вт (мощность подается на один АНЭ, второй находится в резерве);

- регистрация температуры АНЭ через каждые 5 с в течение 10 мин (или до достижения максимальной температуры — 1073 К);

- прекращение подачи мощности на АНЭ и остывание ЭТМД до 298 К.

Для определения динамики нагрева рабочего тела в ЭТМД с двумя АНЭ предложена методика проведения экспериментальных исследований в вакуумной камере в составе образца КДУ, которая включает в себя:

- подключение электрических разъемов ЭТМД к КДУ;

- предварительный разогрев конструкции ЭТМД и испарителя за счет подачи напряжения на АНЭ ЭТМД от 10 Вт до 60 Вт и подача напряжения

10 Вт на АНЭ испарителя без подачи рабочего тела;

- подача напряжения на электроклапан и подача рабочего тела в ЭТМД (в качестве рабочего тела использован изобутан);

- ограничение температуры нагрева ЭТМД — 1073 К;

- прекращение подачи мощности на АНЭ и напряжения на электроклапан, остывание ЭТМД до 298 К.

Результаты исследований

На рис. 4–5 приведены результаты экспериментальных исследований ЭТМД с двумя АНЭ на воздухе без теплозащиты и с использованием теплозащиты.

Экспериментальные исследования ЭТМД с двумя АНЭ в нормальных условиях (атмосфере) подтвердили работоспособность микродвигателя. Применение теплозащиты на ЭТМД позволяет увеличить температуру нагрева конструкции ЭТМД на величину ΔT , а также позволяет уменьшить время нагрева до заданной температуры при одинаковой подаваемой мощности на ЭТМД с теплозащитой и без теплозащиты (рис. 6).

Кроме того, было определено максимальное время выхода ЭТМД на квазистационарный режим, что позволило определить максимальное время предварительного разогрева ЭТМД перед подачей рабочего тела при работе по штатной циклограмме в условиях вакуума.

С учетом полученных результатов в нормальных условиях (атмосфере) были проведены экспе-

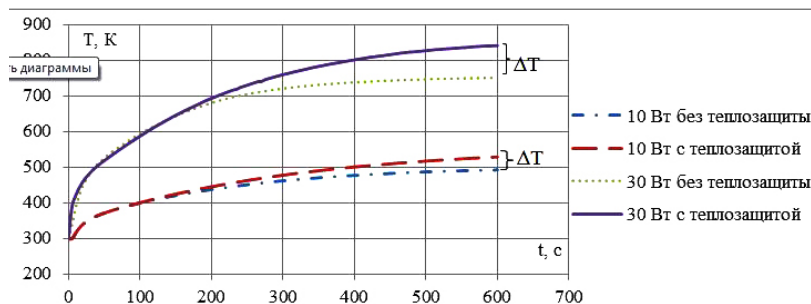


Рис. 6. Влияние теплозащиты на температурные характеристики ЭТМД с двумя АНЭ
 Fig. 6. The influence of thermal protection on temperature characteristics resistojet with two heating elements

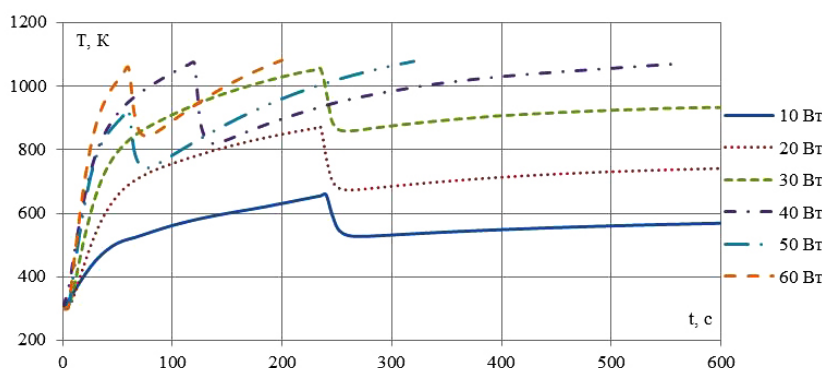


Рис. 7. Результаты экспериментальных исследований ЭТМД с двумя АНЭ в вакууме
 Fig. 7. Results of experimental studies of resistojet with two heating elements in vacuum

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований ЭТМД с двумя АНЭ в условиях вакуума
 Table 1. Results of experimental studies of a resistojet with two heating elements under vacuum conditions

№	Время, t, с	Подаваемая на АНЭ мощность, Вт					
		10	20	30	40	50	60
		Время предварительного разогрева ЭТМД, с					
		240			120	60	
		Температура АНЭ, К					
1	10	301,75	303,46	303,68	307,80	402,66	408,67
2	50	506,05	634,27	769,62	914,10	887,76	1017,81
3	100	561,63	750,62	902,28	1042,39	782,81	890,46
4	150	599,90	804,84	974,17	831,17	881,60	1002,72
5	200	631,19	845,28	1025,27	897,40	960,74	1082,14
6	250	555,54	707,11	893,87	949,18	1020,49	
7	300	531,76	683,34	873,24	984,62	1064,38	
8	350	540,90	699,49	891,77	1011,81		
9	400	548,61	712,44	906,40	1030,81		
10	450	554,98	722,57	915,78	1044,56		
11	500	560,36	730,26	923,67	1056,53		
12	550	564,91	736,19	930,02	1068,43		
13	600	568,75	740,89	933,26			

риментальные исследования ЭТМД с двумя АНЭ в вакуумной камере с подачей рабочего тела (изобутан), результаты которых представлены на рис. 7 и в табл. 1.

Выводы

В ходе проведенных автономных экспериментальных исследований была подтверждена работоспособность ЭТМД с двумя АНЭ.

Экспериментальные исследования на воздухе показали необходимость использования теплозащиты. При одинаковой подаваемой мощности на АНЭ ЭТМД с теплозащитой были достигнуты более высокие значения температуры по сравнению с ЭТМД без теплозащиты, в частности за 10 минут работы достигнуты следующие значения температуры:

— при мощности 10 Вт температура АНЭ составила 528,8 К (отличие от температуры без теплозащиты — $\Delta T = 36,4$ К);

— при мощности 20 Вт температура АНЭ составила 694,4 К ($\Delta T = 48,5$ К);

— при мощности 30 Вт температура АНЭ составила 840,3 К ($\Delta T = 89,6$ К);

— при мощности 40 Вт температура АНЭ составила 953,8 К ($\Delta T = 128,5$ К);

— при мощности 50 Вт температура АНЭ составила 1040 К ($\Delta T = 147,7$ К);

— при мощности 60 Вт температура АНЭ составила 1072,5 К ($\Delta T = 152,5$ К).

Данные исследования подтверждают необходимость применения теплозащиты ЭТМД в условиях вакуума.

В ходе проведения экспериментальных исследований было определено время предварительного разогрева ЭТМД при «горячем» способе запуска. Для мощностей 10 Вт, 20 Вт, 30 Вт время предварительного разогрева конструкции составило 4 минуты с достижением следующих максимальных температур АНЭ до подачи рабочего тела (ТАНЭ) и максимальных температур АНЭ после подачи рабочего тела (ТАНЭ с рт):

— 10 Вт — $T_{\text{АНЭ}} = 658,3$ К; $T_{\text{АНЭ с рт}} = 568,75$ К;

— 20 Вт — $T_{\text{АНЭ}} = 871,24$ К; $T_{\text{АНЭ с рт}} = 740,89$ К;

— 30 Вт — $T_{\text{АНЭ}} = 1054,99$ К; $T_{\text{АНЭ с рт}} = 933,26$ К;

Для мощности 40 Вт время предварительного разогрева конструкции составило 2 минуты, корпус ЭТМД разогрелся до 1072,97 К, а максимальная температура АНЭ после подачи рабочего тела составила 1072 К.

Для мощностей 50 Вт и 60 Вт время предварительного разогрева составило 1 минуту, с достижением следующих температур: 50 Вт — корпуса $T_{\text{АНЭ}} = 924,67$ К; $T_{\text{АНЭ с рт}} = 1078,5$ К; 60 Вт — $T_{\text{АНЭ}} = 1058,19$ К; $T_{\text{АНЭ с рт}} = 1082,14$ К.

Проведенные экспериментальные исследования ЭТМД с двумя АНЭ показали возможность применения данных микродвигателей как в составе ДУ МКА, так и в составе микро- и наноспутников с ограниченным потреблением мощности до 20 Вт.

В дальнейшем планируется проведение экспериментальных исследований по перераспределению общей подаваемой мощности на оба АНЭ ЭТМД и определения оптимальной циклограммы работы микродвигателя.

Список источников

1. Sabatinia M., Volpeb R., Palmerinic G. B. Centralized visual based navigation and control of a swarm of satellites for on-

orbit servicing // *Acta Astronautica*. 2020. Vol. 171. P. 323–334. DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.03.015.

2. Lev D., Myers R. M., Lemmer K. M. [et al.]. The technological and commercial expansion of electric propulsion // *Acta Astronautica*. 2019. Vol. 159. P. 213–227. DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.03/058.

3. Narayanasamy A., Ahmad Y. A., Othman M. Nanosatellites constellation as an IoT communication platform for near equatorial countries // 6th International Conference on Mechatronics — ICOM17. 2017. Vol. 260. P. 1–14. DOI: 10.1088/1757-899X/260/1/012028.

4. Седельников А. В., Орлов Д. И., Сердакова В. В., Николаева А. С. Исследование возмущений от температурного удара панели солнечной батареи при моделировании вращательного движения малого космического аппарата вокруг центра масс // *Труды МАИ*. 2022. № 126. DOI: 10.34759/trd-2022-126-11.

5. Woellert K., Ehrenfreund P., Ricco A. J. [et al.]. Cubesats: Cost-effective science and technology platforms for emerging and developing nations // *Advances in Space Research*. 2010. Vol. 47 (4). P. 663–684. DOI: 10.1016/j.asr.2010.10.009.

6. Блинов В. Н., Косицын В. В., Лукьянчик А. И., Степень П. В., Ячменев П. С. Исследование основных проектных параметров импульсной электротермической двигательной установки наноспутников // *Космонавтика и ракетостроение*. 2022. № 2 (125). С. 75–88. EDN: TQJNNX.

7. Блинов В. Н., Косицын В. В., Лукьянчик А. И. [и др.]. Исследования надежности импульсной электротермической двигательной установки наноспутника // *Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2021. Т. 5, № 4. С. 75–82. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-4-75-82.

8. Romei F., Grubišić A. N. Numerical study of a novel monolithic heat exchanger for electrothermal space propulsion // *Acta Astronautica*. 2019. Vol. 159. P. 8–16. DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.03.025.

9. Белоконов И. В., Ивлиев А. В., Богатырев А. М. [и др.]. Выбор проектного облика двигательной установки наноспутника // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии машиностроения*. 2019. Т. 18, № 3. С. 29–37. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-3-29-37.

10. Kwan P. W., Huangb X., Zhanga X. Design and testing of a microelectromechanical-system-based high heat flux vaporizing liquid microthruster // *Acta Astronautica*. 2020. Vol. 170. P. 719–734. DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.01.017.

11. Belokonov I., Ivliev A. Development of a propulsion system for a maneuvering module of a low-orbit nanosatellite // *Procedia Engineering*. 2017. № 185. P. 366–372.

12. Блинов В. Н., Шалай В. В., Зубарев С. И., Косицын В. В., Рубан В. И., Ходорева Е. В. Исследования электротермических микродвигателей корректирующих двигательных установок маневрирующих малых космических аппаратов: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 264 с. ISBN 978-5-8149-1710-2.

13. Romei F., Grubišić A. N. Validation of an additively manufactured resistojet through experimental and computational analysis // *Acta Astronautica*. 2020. Vol. 167. P. 14–22. DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.10.046.

14. Блинов В. Н., Лукьянчик А. И. Оценка эффективности малогабаритного электротермического микродвигателя с автономным нагревательным элементом // *Проблемы машиноведения: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф.*, Омск, 17–19 марта 2020 года. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2020. С. 223–230. EDN: WQTTWY.

15. Neji B., Hamrouni C., Alimi A. M. [et al.]. Design and prototype of an image capturing and processing system for ERPSat-1 PicoSatellite, in RAST '09 // 4th International Conference on Recent Advances in Space Technology. Recent Advances in Space Technologies. 2009. P. 1–12. DOI: 10.1109/RAST.2009.5158290, 2009.

16. ГОСТ 13268-88. Электронагреватели трубчатые. Введ. 1990—01—01. Москва: Госстандарт Союза ССР: Изд-во стандартов, 1989. 15 с.

БЛИНОВ Виктор Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Авиа- и ракетостроение» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск. SPIN-код: 8934-4313

AuthorID (РИНЦ): 530029

AuthorID (SCOPUS): 56503115200

ORCID: 0000-0002-9309-4610

Адрес для переписки: blinovviktor@yandex.ru

КОСИЦЫН Валерий Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск. SPIN-код: 8766-8891

AuthorID (РИНЦ): 723680

AuthorID (SCOPUS): 56503934600

Адрес для переписки: valera_kositsin@mail.ru

ЛУКЬЯНЧИК Антон Игоревич, старший преподаватель кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск. SPIN-код: 2378-9723

ORCID: 0000-0002-3309-4125

AuthorID (SCOPUS): 57189506536

ResearcherID: O-8722-2016

Адрес для переписки: lukyanchik1991@mail.ru

СТЕПЕНЬ Павел Валерьевич, старший преподаватель кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-code: 4322-5980

AuthorID (РИНЦ): 1004744

AuthorID (SCOPUS): 57222345428

Адрес для переписки: stepen2@mail.ru

ЯЧМЕНЕВ Павел Сергеевич, старший преподаватель кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск. SPIN-код: 4744-0940

AuthorID (РИНЦ): 812493

ORCID: 0000-0003-3483-4321

AuthorID (SCOPUS): 57193405041

ResearcherID: P-5381-2016

Адрес для переписки: yachmenev-pavel@mail.ru

Для цитирования

Блинов В. Н., Косицын В. В., Лукьянчик А. И., Степень П. В., Ячменев П. С. Автономные экспериментальные исследования электротермического микродвигателя с двумя автономными нагревательными элементами для наноспутников // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 4. С. 48—55. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-48-55.

Статья поступила в редакцию 12.10.2023 г.

© В. Н. Блинов, В. В. Косицын, А. И. Лукьянчик,
П. В. Степень, П. С. Ячменев



AUTONOMOUS EXPERIMENTAL STUDIES RESISTOJET WITH TWO AUTONOMOUS HEATING ELEMENTS FOR NANOSATELLITES

V. N. Blinov, V. V. Kositsyn, A. I. Lukyanchik,
P. V. Stepen, P. S. Yachmenev

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The purpose of the work is to conduct autonomous experimental studies of an resistojet with two autonomous heating elements with a diameter of 4 mm. As a result of experimental studies of the resistojet, the heating dynamics of the micromotor structure and the working fluid (isobutane) in the power range from 5 W to 60 W is determined. Experimental studies have shown the possibility of using the proposed resistojet design with two autonomous heating elements not only on small spacecraft, but also on micro- and nanosatellites under conditions of limited on-board energy.

Keywords: nanosatellite, propulsion system, resistojet, autonomous experimental research, autonomous heating element.

References

1. Sabatinia M., Volpeb R., Palmerinic G. B. Centralized visual based navigation and control of a swarm of satellites for on-orbit servicing // *Acta Astronautica*. 2020. Vol. 171. P. 323–334. DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.03.015. (In Engl.).
2. Lev D., Myers R. M., Lemmer K. M. [et al.]. The technological and commercial expansion of electric propulsion // *Acta Astronautica*. 2019. Vol. 159. P. 213–227. DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.03.058. (In Engl.).
3. Narayanasamy A., Ahmad Y. A., Othman M. Nanosatellites constellation as an IoT communication platform for near equatorial countries // 6th International Conference on Mechatronics – ICOM17. 2017. Vol. 260. P. 1–14. DOI: 10.1088/1757-899X/260/1/012028. (In Engl.).
4. Sedel'nikov A. V., Orlov D. I., Serdakova V. V., Nikolayeva A. S. Issledovaniye vozmushcheniy ot temperaturnogo udara paneli solnechnoy batarei pri modelirovani vrashchatel'nogo dvizheniya malogo kosmicheskogo apparata vokrug tsentra mass [Investigation of disturbances from a temperature shock of a solar battery panel when simulating the rotational motion of a small spacecraft around the center of mass] // *Trudy MAI. Trudy MAI*. 2022. No. 126. DOI: 10.34759/trd-2022-126-11. (In Russ.).
5. Woellert K., Ehrenfreund P., Ricco A. J. [et al.]. Cubesats: Cost-effective science and technology platforms for emerging and developing nations // *Advances in Space Research*. 2010. Vol. 47 (4). P. 663–684. DOI: 10.1016/j.asr.2010.10.009. (In Engl.).
6. Blinov V. N., Kositsyn V. V., Luk'yanchik A. I., Stepen' P. V., Yachmenev P. S. Issledovaniye osnovnykh proyektnykh parametrov impul'snoy elektrotermicheskoy dvigatel'noy ustanovki nanospudnikov [Research of the main design parameters pulsed electrothermal propulsion system of nanosatellites] // *Kosmonavtika i raketostroyeniye. Cosmonautics and Rocket Engineering*. 2022. No. 2 (125). P. 75–88. EDN: TQJNNX. (In Russ.).
7. Blinov V. N., Kositsyn V. V., Luk'yanchik A. I. [et al.]. Issledovaniya nadezhnosti impul'snoy elektrotermicheskoy dvigatel'noy ustanovki nanospudnika [Research on reliability of pulsed electrothermal propulsion system of nanosatellite] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2021. Vol. 5, no. 4. P. 75–82. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-4-75-82. (In Russ.).
8. Romei F., Grubišić A. N. Numerical study of a novel monolithic heat exchanger for electrothermal space propulsion // *Acta Astronautica*. 2019. Vol. 159. P. 8–16. DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.03.025. (In Engl.).
9. Belokonov I. V., Ivliyev A. V., Bogatyrev A. M. [et al.]. Vybor proyektnogo oblika dvigatel'noy ustanovki nanospudnika [Selection of project structure for nanosatellite propulsion system] // *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii mashinostroyeniye. Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 18, no. 3. P. 29–37. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-3-29-37. (In Russ.).
10. Kwan P. W., Huangb X., Zhanga X. Design and testing of a microelectromechanical-system-based high heat flux vaporizing liquid microthruster // *Acta Astronautica*. 2020. Vol. 170. P. 719–734. DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.01.017. (In Engl.).
11. Belokonov I., Ivliyev A. Development of a propulsion system for a maneuvering module of a low-orbit nanosatellite // *Procedia Engineering*. 2017. No. 185. P. 366–372. (In Engl.).
12. Blinov V. N., Shalay V. V., Zubarev S. I., Kositsyn V. V., Ruban V. I., Khodoreva E. V. Issledovaniya elektrotermicheskikh mikrovdigately korrektruyushchikh dvigatel'nykh ustanovok manevriruyushchikh malyykh kosmicheskikh apparatov [The researches of correcting power units electro-thermal micromotors of maneuverable small space vehicles]. Omsk, 2014. 264 P. ISBN 978-5-8149-1710-2. (In Russ.).
13. Romei F., Grubišić A. N. Validation of an additively manufactured resistojet through experimental and computational analysis // *Acta Astronautica*. 2020. Vol. 167. P. 14–22. DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.10.046. (In Engl.).
14. Blinov V. N., Luk'yanchik A. I. Otsenka effektivnosti malogabaritnogo elektrotermicheskogo mikrovdigatelya s avtonomnym nagrevatel'nyim elementom [Evaluation of the efficiency of a small-sized resistojet with an autonomous heating element] // *Problemy mashinovedeniya. Mechanical Science and Technology*. Omsk, 2020. P. 223–230. (In Russ.).
15. Neji B., Hamrouni C., Alimi A. M. [et al.]. Design and prototype of an image capturing and processing system for ERPSat-1 PicoSatellite, in RAST '09 // 4th International

Conference on Recent Advances in Space Technology. Recent Advances in Space Technologies. 2009. P. 1–12. DOI: 10.1109/RAST.2009.5158290, 2009. (In Engl.).

16. GOST 13268-88. Elektronagrevateli trubchatyye [Tubular Electric Heaters]. Moscow, 1989. 15 p. (In Russ.).

BLINOV Viktor Nikolayevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of Aircraft and Rocket Building Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 8934-4313

AuthorID (RSCI): 530029

AuthorID (SCOPUS): 56503115200

ORCID: 0000-0002-9309-4610

Correspondence address: blinovviktor@yandex.ru

KOSITSIN Valeriy Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Aircraft and Rocket Building Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 8766-8891

AuthorID (RSCI): 723680

AuthorID (SCOPUS): 56503934600

Correspondence address: valera_kositsin@mail.ru

LUKYANCHIK Anton Igorevich, Senior Lecturer of Aircraft and Rocket Building Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2378-9723

ORCID: 0000-0002-3309-4125

AuthorID (SCOPUS): 57189506536

ResearcherID: O-8722-2016

Correspondence address: lukyanchik1991@mail.ru

STEPEN Pavel Valeryevich, Senior Lecturer of Aircraft and Rocket Building Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 4322-5980

AuthorID (RSCI): 1004744

AuthorID (SCOPUS): 57222345428

Correspondence address: stepen2@mail.ru

YACHMENEV Pavel Sergeyevich, Senior Lecturer of Aircraft and Rocket Building Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 4744-0940

ORCID: 0000-0003-3483-4321

AuthorID (SCOPUS): 57193405041

ResearcherID: P-5381-2016

Correspondence address: yachmenev-pavel@mail.ru

For citations

Blinov V. N., Kositsyn V. V., Lukyanchik A. I., Stepen P. V., Yachmenev P. S. Autonomous experimental studies resistojet with two autonomous heating elements for nanosatellites // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2023. Vol. 7, no. 4. P. 48–55. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-48-55.

Received October 12, 2023.

© V. N. Blinov, V. V. Kositsyn, A. I. Lukyanchik,
P. V. Stepen, P. S. Yachmenev



ПОСТРОЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ОБЛЕТА БАЗОВОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ЦЕЛЬЮ НАРУЖНОГО ОСМОТРА И ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ НА МАНЕВР ОБЛЕТА

В. И. Рубан, В. Н. Блинов, В. В. Косицын,
А. И. Лукьянчик, П. С. Ячменев, П. В. Степень

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

В работе представлена методика построения траектории облета базового космического аппарата с целью его инспектирования с помощью носимого на борту малого космического аппарата и оценка потребных запасов характеристической скорости на маневр облета. Использование методов приближенных вычислений позволило получить простейшие зависимости параметров траектории с высокой точностью. Методика позволяет не только оценить энергетические затраты на орбитальные маневры, но и позволяет рассчитать величины управляющих импульсов для реальной задачи управления движением малого космического аппарата относительно базового космического аппарата.

Ключевые слова: малый космический аппарат, базовый космический аппарат, траектория облета, орбита, маневр облета.

Введение

При эксплуатации больших космических аппаратов (КА) нередко возникает необходимость наружного осмотра внешней поверхности для контроля целостности видимых узлов и агрегатов и выявления повреждений и деградации аппаратуры и элементов конструкции [1–6]. Для этого на борту основного базового КА имеет смысл иметь малый спутник — малый космический аппарат (МКА), имеющий возможность облета основного базового КА с проведением визуального внешнего осмотра [7–8].

Актуальность этой задачи подтверждается хотя бы данными о повреждении внешней обшивки приборно-агрегатного отсека транспортного пилотируемого корабля «Союз МС-22», которое произошло 15 декабря 2022 г. В этом случае космонавт Анна Кикина сфотографировала и сняла на видео корабль с помощью камеры на манипуляторе из состава внешнего оборудования Международной космической станции (МКС) [10]. Такой осмотр возможен только в случае наличия в составе базового корабля манипулятора, при этом доступной для осмотра будет не вся внешняя поверхность и управление манипулятором требует присутствия оператора, что на автоматических КА и, в отсутствие экипажа, на пилотируемых — невозможно.

Наличие на борту базового КА малого МКА, оснащенного двигательной установкой, обеспечивающей маневрирование, позволит осуществить облет базового КА с проведением внешнего осмотра и фиксации состояния наружной поверхности с контролем возможных повреждений [11–15].

Постановка задачи исследования

Целью настоящей работы является создание инженерной методики построения траектории облета базового КА с помощью носимого на борту КА малого МКА и оценка потребных запасов характеристической скорости на маневр облета. Будем рассматривать движение в плоскости орбиты и воспользуемся для построения траектории особенно-стями центрального поля тяготения.

Теория

Будем считать, что базовый КА движется по круговой орбите. Представление реальной орбиты как круговой не противоречит действительности, так как эксцентриситет орбит низкоорбитальных КА, как правило, не превышает 0,001. Траектория облета МКА относительно базового КА может быть сформирована за счет перевода его на эллиптическую орбиту с периодом обращения, равным периоду базового КА.

Целью облета КА малым МКА является визуальный осмотр с помощью камер видимого и инфракрасного диапазона. Для проведения осмотра и выявления мелких деталей расстояние между КА и МКА при проведении осмотра с применением оптики высокого разрешения должно составлять от нескольких десятков до нескольких сотен метров в зависимости от размеров базового КА.

Будем основываться на основном предположении, что для перемещения МКА относительно базового КА по замкнутой траектории в течение нескольких витков необходимо равенство периодов

обращения. Радиус орбиты базового КА составит как минимум 6700 км. Поэтому параметры траектории относительного перемещения МКА являются заведомо малыми величинами по сравнению с орбитальными параметрами — $\Delta R \ll R_{КА}$, где ΔR — радиальное смещение МКА относительно КА.

Пусть базовый КА находится на круговой орбите радиуса $R_{КА}$, тогда период его обращения составит [16, 17]:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R_{КА}^3}{\mu}}, \quad (1)$$

где $R_{КА}$ — радиус орбиты КА;

$\mu = 3,98614 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$ — гравитационная постоянная Земли.

Период обращения МКА осмотра [16, 17]:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a_{МКА}^3}{\mu}}, \quad (2)$$

где $a_{МКА}$ — большая полуось орбиты МКА.

Из приведенных соотношений видно, что большая полуось орбиты КА осмотра должна быть равна радиусу орбиты базового КА — $a_{МКА} = R_{КА}$.

В апогее орбиты осмотра радиус МКА будет больше радиуса орбиты базового КА на малую величину ΔR и составит — $R_{МКА}^a = R_{КА} + \Delta R$, а в перигее орбиты — $R_{МКА}^p = R_{КА} - \Delta R$.

Для построения орбиты облета и осмотра базового КА с помощью имеющегося на борту МКА воспользуемся заведомо оптимальными кеплеровскими импульсными переходами с орбиты на орбиту.

Последовательность маневров формирования орбиты облета предполагается следующая:

- в одной из точек орбиты, выбранной из дополнительных условий, например, освещенности поверхности базового КА, МКА отделяется от КА, и к нему прикладывается импульс скорости по или против орбитальной скорости КА;

- в результате движения по переходной орбите через полвитка (половину периода обращения КА) МКА оказывается в апогее или перигее переходной орбиты;

- при достижении апсидной точки к МКА прикладывается импульс характеристической скорости против или по орбитальной скорости;

- в результате формируется орбита МКА, отличная от орбиты базового КА, период обращения которой строго равен периоду обращения базового КА — $T_{МКА} = T_{КА}$.

Точность формирования параметров орбиты и эллипса облета будем полагать инженерной, то есть не идеальной, а с вполне допустимыми отклонениями, которые на практике составят сотые доли процента от рассчитанных по классическим зависимостям значений.

Это позволит использовать для определения величин импульса характеристической скорости перехода с орбиты базового КА на орбиту облета МКА не строгие математические зависимости, а приближенные формулы.

Исходя из закона сохранения энергии, который для центрального поля тяготения выглядит следующим образом:

$$V^2 = \mu \left(\frac{2}{R} - \frac{1}{a} \right), \quad (3)$$

где R — радиус орбиты в любой расчетной точке, a — большая полуось эллипса орбиты.

Для определения значений скорости в точках орбиты МКА получим:

$$V = \sqrt{\mu \left(\frac{2}{R_{МКА}} - \frac{1}{a_{МКА}} \right)}. \quad (4)$$

Первым импульсом формируется переходная орбита с радиусом перигея $R_{МКА}^p = R_{КА}$ и апогеем $R_{МКА}^a = R_{КА} + \Delta R$, большая полуось которой равна $a_{МКА} = R_{КА} + \Delta R/2$, тогда величина импульса перехода определится как:

$$\Delta V_1 = V_{МКА}^p - V_{КА} = \sqrt{\mu \left(\frac{2}{R_{МКА}} - \frac{1}{R_{КА} + \Delta R/2} \right)} - \sqrt{\frac{\mu}{R_{КА}}}. \quad (5)$$

Освободимся под корнем от размерных величин безразмерными относительными путем замены $\delta = \Delta R/R_{КА}$ и получим:

$$\Delta V_1 = \sqrt{\frac{\mu}{R_{КА}}} \left(\sqrt{2 - \frac{1}{1 + \delta/2}} \right). \quad (6)$$

Воспользуемся зависимостями для приближенных вычислений. Если $\gamma \ll 1$, то для дроби имеем $1/(1 + \gamma) \approx 1 - \gamma$ (или $1/(1 - \gamma) \approx 1 + \gamma$) и для квадратного корня $\sqrt{1 + \gamma} \approx 1 + \gamma/2$ (или $\sqrt{1 - \gamma} \approx 1 - \gamma/2$) [18].

С учетом того, что величина δ много меньше единицы: $\delta \ll 1$ и, избавившись от дроби под корнем и в дальнейшем от самого квадратного корня, получим приближенное выражение для величины импульса перехода на переходную орбиту:

$$\Delta V_1 \approx \sqrt{\frac{\mu}{R_{КА}}} \left(\sqrt{\frac{1 + \delta}{2}} - 1 \right) \approx \sqrt{\frac{\mu}{R_{КА}}} \frac{\delta}{4}. \quad (7)$$

Уйдя от безразмерной относительной величины к размерным величинам и считая полученные значения достаточно точными, имеем величину первого импульса перехода в виде:

$$\Delta V_1 = \sqrt{\frac{\mu}{R_{КА}}} \frac{\Delta R}{4R_{КА}} = V_{КА} \frac{\Delta R}{4R_{КА}} = \omega_{КА} \frac{\Delta R}{4}, \quad (8)$$

где ω — угловая скорость КА.

Вторым импульсом в апогее переходной орбиты формируется орбита с периодом, равным периоду базового КА с большой полуосью, равной радиусу орбиты КА. Начальной орбитой для этого маневра является эллиптическая переходная орбита с большой полуосью, равной $a = R_{КА} + \Delta R/2$, и точка приложения импульса в апогее величиной радиуса $R_{МКА}^a = R_{КА} + \Delta R$. Конечная орбита МКА должна иметь период равный периоду КА. Большая полуось этой орбиты равна радиусу КА $a_{МКА} = R_{КА}$, и радиус перигея равен $R_{МКА}^p = R_{КА} - \Delta R$.

Для формирования новой орбиты следует изменить скорость в апогее переходной орбиты. Определим скорость в апогее переходной орбиты и перейдем к безразмерным отклонениям:

$$V_{пер}^a = \sqrt{\mu \left(\frac{2}{R_{КА} + \Delta R} - \frac{1}{R_{КА} + \frac{\Delta R}{2}} \right)} =$$



$$= \sqrt{\frac{\mu}{R_{КА}}} \sqrt{\frac{2}{1+\delta} - \frac{1}{1+\frac{\delta}{2}}}. \quad (9)$$

Воспользуемся свойством малости величины δ и, как в предыдущем случае, используя свойства приближенных вычислений, имеем скорость в апогее переходной орбиты:

$$V_{пер}^a \cong \sqrt{\frac{\mu}{R_{КА}}} \left(1 - \frac{3\delta}{4}\right). \quad (10)$$

Формируемая новая орбита МКА с периодом, равным периоду базового КА с большой полуосью, равной радиусу орбиты КА, должна иметь в апогее скорость:

$$\begin{aligned} V_{нов}^a &= \sqrt{\mu \left(\frac{2}{R_{КА} + \Delta R} - \frac{1}{a_{МКА}} \right)} = \\ &= \sqrt{\mu \left(\frac{2}{R_{КА} + \Delta R} - \frac{1}{R_{КА}} \right)}. \end{aligned} \quad (11)$$

Переходя к безразмерным отклонениям и используя свойства приближенных вычислений, скорость в апогее новой орбиты получим в виде:

$$V_{нов}^a = \sqrt{\frac{\mu}{R_{КА}}} \sqrt{\frac{2}{1+\delta} - 1} \cong \sqrt{\frac{\mu}{R_{КА}}} (1 - \delta). \quad (12)$$

Определим величину импульса скорости маневра с переходной орбиты МКА на новую орбиту:

$$\begin{aligned} \Delta V_{нов}^a &= V_{нов}^a - V_{пер}^a \cong \\ &\cong \sqrt{\frac{\mu}{R_{КА}}} (1 - \delta) - \sqrt{\frac{\mu}{R_{КА}}} \left(1 - \frac{3\delta}{4}\right). \end{aligned} \quad (13)$$

Преобразуя полученное выражение, имеем:

$$\Delta V_{нов}^a \cong \sqrt{\frac{\mu}{R_{КА}}} (1 - \delta - 1 + \frac{3\delta}{4}) \cong -\sqrt{\frac{\mu}{R_{КА}}} \frac{\delta}{4}. \quad (14)$$

Уйдя от безразмерной относительной величины к размерным величинам и считая полученные значения достаточно точными, имеем величину первого импульса перехода в виде:

$$\begin{aligned} \Delta V_{нов}^a &= -\sqrt{\frac{\mu}{R_{КА}}} \frac{\Delta R}{4R_{КА}} = \\ &= -V_{КА} \frac{\Delta R}{4R_{КА}} = -\omega_{КА} \frac{\Delta R}{4}. \end{aligned} \quad (15)$$

В результате сформирована новая орбита МКА, отличная от орбиты базового КА, но период которой равен периоду обращения КА — $T_{МКА} = T_{КА}$.

Сравнивая полученные зависимости $\Delta V_{нов}^a$ и ΔV_1 , следует отметить их равенство по абсолютной величине и различие в знаках, которое определяется направлением отклонения радиуса орбиты МКА в противоположающей точке относительно центра тяготения, в данном случае апсидной (лежащей на линии, соединяющей апогей и перигей).

Период новой орбиты равен периоду обращения базового КА, но изменение большой полуоси приводит к перемещению МКА относительно КА не только по радиусу, что является целью манев-

ра, но и вдоль орбиты. Это перемещение приводит к смещению центра траектории облета, и КА окажется вне замкнутой траектории, описываемой точкой МКА относительно ее смещенного центра, что не позволит произвести осмотр КА в плоскости орбиты со всех сторон.

Определим смещение МКА относительно КА через полвитка в той точке, где предполагается приложение к МКА импульса перехода на орбиту осмотра. Для определения углового и линейного смещения МКА относительно КА по эллиптической орбите воспользуемся ее свойствами.

По любой эллиптической орбите, в том числе и переходной орбите, МКА движется с переменной угловой скоростью, но ее среднее значение, как и период обращения, определяются большой полуосью. Будем искать это смещение за полпериода обращения КА. Определим смещение как произведение половины периода КА на величину средней угловой скорости движения МКА по переходной орбите.

Среднюю угловую скорость эллиптической орбиты вычислим из периода обращения:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a_{МКА}^3}{\mu}}, \quad (16)$$

откуда имеем среднее значение угловой скорости КА:

$$\omega_{МКА}^{cp} = \sqrt{\frac{\mu}{a_{МКА}^3}}. \quad (17)$$

За полпериода обращения КА — $\frac{T_{КА}}{2} = \sqrt{\frac{R_{КА}^3}{\mu}}$

угловое смещение МКА относительно КА при движении МКА по переходной орбите будет равно:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{МКА} &= \pi \frac{T_{КА}}{2} \omega_{МКА}^{cp} - \pi = \\ &= \pi \left(\sqrt{\frac{R_{КА}^3}{\mu}} \sqrt{\frac{\mu}{a_{МКА}^3}} - 1 \right) = \pi \left(\sqrt{\frac{R_{КА}^3}{a_{МКА}^3}} - 1 \right). \end{aligned} \quad (18)$$

Подставим значение большой полуоси переходной орбиты МКА $a_{МКА}$, уйдем от размерных значений к безразмерным:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{МКА} &= \pi \sqrt{\frac{R_{КА}^3}{(R_{КА} + \frac{\Delta R}{2})^3}} - \pi = \\ &= \pi \left(\sqrt{\frac{1}{(1 + \frac{\delta}{2})^3}} - 1 \right). \end{aligned} \quad (19)$$

Представим куб суммы в виде отдельных слагаемых:

$$\varepsilon_{МКА} = \pi \left(\sqrt{\frac{1}{1 + 3\frac{\delta}{2} + 3\frac{\delta^2}{4} + \frac{\delta^3}{8}}} - 1 \right). \quad (20)$$

Отбросим величины выше второго порядка малости с учетом малости δ по сравнению с 1, избавимся от знаменателя и квадратного корня. В итоге имеем:

$$\varepsilon_{\text{МКА}} = -\frac{3\pi}{4}\delta = -\frac{3\pi}{4}\frac{\Delta R}{R_{\text{КА}}} \quad (21)$$

Ввиду малости ΔR по сравнению с $R_{\text{КА}}$ величину линейного смещения вдоль орбиты по прямой определим как произведение углового смещения на радиус орбиты КА:

$$\Delta L_{\text{МКА}}^{\text{пер}} = \varepsilon_{\text{МКА}} R_{\text{КА}} = -\frac{3\pi}{4}\Delta R = -2,356194\Delta R. \quad (22)$$

Из выражения для импульса скорости перехода на переходную орбиту $\Delta V_1 = \omega_{\text{КА}} \frac{\Delta R}{4}$ определим обратную зависимость: выразим ΔR через ΔV_1 и получим:

$$\Delta R = 4 \frac{\Delta V_1}{\omega_{\text{КА}}}. \quad (23)$$

Тогда угловое смещение через полвитка вдоль орбиты определится как:

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{МКА}}^{\text{пер}} &= -3 \frac{\pi}{\omega_{\text{КА}}} \Delta V_1 = \\ &= -3 \frac{T_{\text{КА}}}{2} \Delta V_1 = -\frac{3}{2} T_{\text{КА}} \Delta V_1. \end{aligned} \quad (24)$$

Для компенсации полученного углового смещения МКА относительно КА необходимо ввести дополнительный виток орбиты фазирования. Для этого следует перевести МКА не сразу на орбиту осмотра, а импульс $\Delta V_{\text{нов}}$ заменить на $\Delta V_2 = \Delta V_{\text{нов}} - 1/2 \Delta V_1 = -3/2 \Delta V_1$, и за счет фазирования смещение будет:

$$\Delta L_{\text{МКА}}^{\text{фаз}} = -3T_{\text{КА}} \left(-\frac{\Delta V_1}{2} \right) = \frac{3}{2} T_{\text{КА}} \Delta V_1. \quad (25)$$

Суммарное смещение МКА вдоль орбиты относительно КА в апогее за счет движения по переходной орбите и орбите фазирования составит:

$$\begin{aligned} \Delta_{\Sigma} &= \Delta L_{\text{МКА}}^{\text{пер}} + \Delta L_{\text{МКА}}^{\text{фаз}} = \\ &= -3 \frac{T_{\text{КА}}}{2} \Delta V_1 + \frac{3}{2} T_{\text{КА}} \Delta V_1 = 0. \end{aligned} \quad (26)$$

Последним, третьим, импульсом после витка на орбите фазирования будет импульс перехода на орбиту осмотра $\Delta V_3 = 1/2 \Delta V_1$, потребный для перехода с орбиты фазирования на орбиту осмотра.

Таким маневром за счет трех импульсов МКА переводится на замкнутую траекторию движения относительно базового КА. Суммарные затраты характеристической скорости перехода МКА на орбиту осмотра составят:

$$\begin{aligned} \Delta V_{\Sigma} &= |\Delta V_1| + |\Delta V_2| + |\Delta V_3| = \\ &= |\Delta V_1| \left(1 + \frac{3}{2} + \frac{1}{2} \right) = \frac{3}{4} \omega_{\text{КА}} \Delta R. \end{aligned} \quad (27)$$

С учетом требования возврата МКА на борт базового КА эти энергетические затраты удваиваются и составят:

$$\Delta V_{\Sigma}^{\text{возр}} = \frac{3}{2} \omega_{\text{КА}} \Delta R. \quad (28)$$

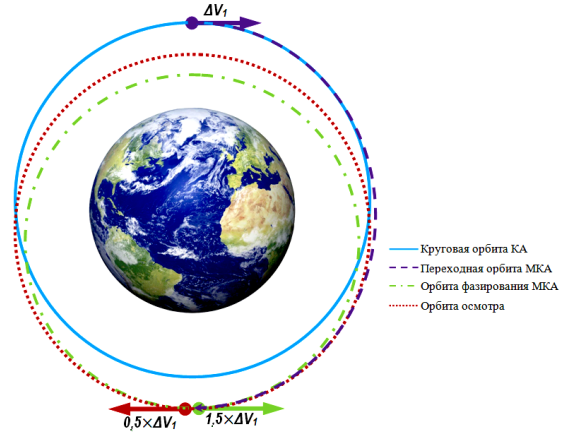


Рис. 1. Схема формирования траектории осмотра с внутренним фазированием (движение КА и МКА по часовой стрелке)

Fig. 1. Scheme for forming an inspection trajectory with internal phasing (motion of the spacecraft and small spacecraft clockwise)

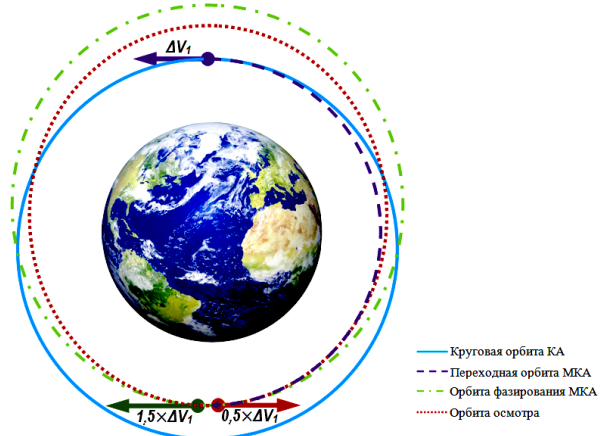


Рис. 2. Схема формирования траектории осмотра с внешним фазированием (движение КА и МКА по часовой стрелке)

Fig. 2. Scheme for forming an inspection trajectory with external phasing (motion of the spacecraft and small spacecraft clockwise)

Так, для проведения наружного осмотра базового КА с учетом последующего возврата МКА на борт КА для высоты орбиты 400 км, что примерно соответствует высоте орбиты МКС, требуемые бортовые запасы характеристической скорости должны составлять всего $\Delta V_{\Sigma}^{\text{возр}} = 0,170$ м/с.

Траектория облета и осмотра базового КА малым МКА может быть сформирована в зависимости от конкретных условий двумя способами с внутренним (рис. 1) и внешним (рис. 2) фазированием. При этом расчет энергетических затрат и величин управляющих импульсов остается неизменным, меняется лишь последовательность и направление этих импульсов.

При внутреннем фазировании (рис. 1) первый импульс ΔV_1 направлен по орбитальной скорости МКА, и формируется переходная орбита. Второй импульс $\Delta V_2 = 1,5\Delta V_1$ выдается через полвитка в окрестности апогейной точки против орбитальной скорости, и формируется орбита фазирования. Третий импульс $\Delta V_3 = 0,5\Delta V_1$ выдается через виток после второго при втором проходе в окрестности

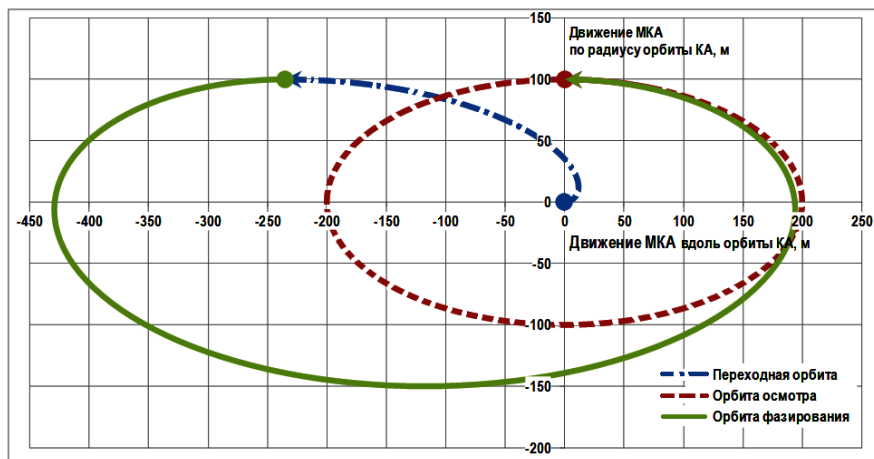


Рис. 3. Портрет облета. Траектория осмотра (облета) МКА относительно КА в подвижной, связанной с КА системе координат
Fig. 3. Portrait of flyby. Trajectory of inspection (flyby) of the small spacecraft relative to the spacecraft in a moving coordinate system associated with the spacecraft

апогейной точки по орбитальной скорости и формируется орбита осмотра.

При внешнем фазировании (рис. 2) первый импульс ΔV_1 направлен против орбитальной скорости МКА, и формируется переходная орбита. Вторым импульс $\Delta V_2 = 1,5\Delta V_1$ выдается через полвитка в окрестности перигейной точки по орбитальной скорости, и формируется орбита фазирования. Третий импульс $\Delta V_3 = 0,5\Delta V_1$ выдается через виток при втором проходе в окрестности перигейной точки против орбитальной скорости, и формируется орбита осмотра.

Результаты исследований

На основании проведенных выкладок были проведены проверочные расчеты траектории движения МКА относительно базового КА. Предполагается, что базовый КА движется по круговой орбите в центральном поле тяготения Земли на высоте 400 км. Малую полуось эллипса облета МКА вокруг базового КА (увеличение высоты в апогее орбиты МКА по сравнению с радиусом орбиты КА) положим равной $\Delta R = 100$ м. В качестве начальных условий при переходе с круговой орбиты КА на орбиту облета МКА приращение скорости для всех трех импульсов были рассчитаны по предложенной методике:

— первый импульс — импульс разгона во время начала маневра $\Delta V_1 = 0,0283276$ м/с;

— второй импульс — импульс торможения через полпериода КА ($T_{КА}/2$) после первого для перехода на орбиту фазирования $\Delta V_2 = 1,5\Delta V_1 = 0,0424914$ м/с;

— третий импульс — импульс разгонный через период КА ($T_{КА}$) после второго для перехода на орбиту фазирования $\Delta V_3 = 0,5\Delta V_1 = 0,0141638$ м/с.

Расчет был проведен по алгоритму, описывающему одновременное движение КА и МКА в центральном поле тяготения Земли. Ввиду относительно малого расстояния между объектами движения нецентральностью поля тяготения Земли пренебрегаем. Интегрирование уравнений движения проводилось апробированным методом Рунге — Кутты четвертого порядка. Алгоритм реализован на языке Pascal. Ошибка в расчетах по предложенной приближенной методике составляет менее 0,01 % — несовпа-

дение наблюдается только в четвертой или пятой значащих цифрах.

Результаты расчета приведены на рис. 3.

На рис. 3 отчетливо видно, что при выходе МКА в точку апогея переходной орбиты через полвитка, по времени через полпериода КА, смещение вдоль орбиты составит $\Delta L_{МКА}^{пер} = -2,356194\Delta R = -235,6194$ м. Это еще раз подчеркивает необходимость фазирования движения МКА. За счет фазирования движения МКА базовый КА становится в центре траектории кругового осмотра.

Перемещение МКА относительно базового КА на орбите осмотра будет выполняться по эллипсу. Малая ось эллипса будет располагаться по радиусу-вектору КА, и ее полуось будет равна величине ΔR , а большая ось будет перпендикулярна радиусу-вектору КА и совпадать с траекторией орбиты КА, и ее полуось будет равна величине $2 \times \Delta R$.

Саму процедуру осмотра базового КА с помощью МКА предполагается проводить за счетное количество витков, как правило, не более 5... 10 витков. Началом осмотра считаем выход МКА на орбиту осмотра после третьего импульса разведения МКА. Сразу следует отметить, что высокой оперативностью такой способ облета базового КА не отличается, так как для выхода на орбиту выполнения целевой задачи требуется значительное время — полтора периода обращения КА. Однако из-за принятой схемы маневров обеспечивается заведомо оптимальное решение задачи с минимально возможными затратами характеристической скорости бортовой двигательной установкой.

Выводы и заключения

Полученные зависимости можно использовать не только для строго круговых орбит, но и для практически круговых с малым эксцентриситетом. В этом случае необходимо с высокой точностью знать угловую скорость движения базового КА по орбите.

Следует отметить, что предложенный способ построения траектории облета базового КА стартовым с его борта МКА можно провести в любом центральном поле тяготения не только на орбите Земли, но и на орбите Луны, Марса и прочее. Понятно, что для КА с большими периодами обраще-

ния, например, на высоких околоземных орбитах, этот способ вряд ли будет применим, что не сужает круг возможных областей его применения.

Применение методов приближенных вычислений к орбитальным расчетам в этой частной задаче позволило наглядно получить простейшие зависимости параметров траектории с высокой инженерной точностью, не хуже сотых долей процента от номинальных значений. Это позволяет не только оценить энергетические затраты на орбитальные маневры без проведения длительных и громоздких вычислений, но и позволяет рассчитать величины управляющих импульсов для реальной задачи управления движением МКА относительно базового КА.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Омского государственного технического университета, внутренняя НИР № 23090В «Теоретические и экспериментальные исследования опытных образцов импульсных двигательных установок для наноспутников» в рамках программы развития «Приоритет-2030».

Список источников

1. Каткалов В. Б. Космические услуги и операции: состояние и перспективы // Воздушно-космическая сфера. 2020. № 2 (103). С. 72–80. DOI: 10.30981/2587-7992-2020-103-2-72-80.
2. Гнездова Е. К. Баллистический анализ методик планирования полета космического аппарата, осуществляющего инспекцию группы объектов на геостационарной орбите // Политехнический молодежный журнал. 2018. № 11. С. 1–9. DOI: 10.18698/2541-8009-2018-11-404. EDN: YPVEYP.
3. Hastings D. E., Putbrese B. L., La Tour P. A. When will on-orbit servicing be part of the space enterprise? // Acta Astronautica. 2016. Vol. 127. P. 655666. DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.07.007.
4. Razoumny Y., Razoumny V., Kozlov P. [et al.]. Method of optimization of the servicing space-based system orbits and detached units maneuvers parameters in the problem of on-orbit-servicing of the given multi-satellite space infrastructure // Making Space Accessible and Affordable to all Countries, Guadalajara. 2016. EDN: YVLZHL.
5. Поздняков А. Ю., Скопинцева Л. М., Гнездова Е. К. [и др.]. Аналитические исследования вариантов организации инспекции космических аппаратов в области ГСО // Актуальные вопросы развития вооружения, военной и специальной техники войск противовоздушной и противоракетной обороны, космических войск воздушно-космических сил: материалы науч.-метод. тр. II Всерос. науч.-практ. конф., Москва, 21 апреля 2017. Москва: Издат. дом Акад. имени Н. Е. Жуковского, 2017. С. 291–297. EDN: YPIKRX.
6. Сачук Д. В., Уперчук Р. А. Расчет баллистических характеристик орбитального движения аппарата-инспектора // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сб. науч. ст. по итогам 11 Международ. науч. конф., Казань, 29–30 ноября 2020. Казань: ООО «КОН-ВЕРТ», 2020. Т. 1. С. 236–237. EDN: RFSFTF.
7. Аверьянов А. В. Аналитический метод расчета движения малого космического аппарата, связанного с базовым космическим аппаратом // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 4. С. 75–77. EDN: KLRWTZ.
8. Егоров Ю. Г., Кургузов А. В., Чернышов А. Н. О групповом полете МКА в ходе космического эксперимента «Инспектор-МКА» // Научное наследие и развитие идей К. Э. Циолковского: материалы 54-х науч. чтений памяти К. Э. Циолковского. Калуга, 17–19 сентября 2019. Калуга: АКФ Политоп, 2019. Т. 1. С. 93–94. EDN: AGDILD.
9. Radhakrishnan R., Edmonson W., Afghah F. [et al.]. Survey of inter-satellite communication for small satellite systems: Physical layer to network layer view // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 18, no. 4. P. 2442–2473. DOI: 10.1109/COMST.2016.2564990.
10. «Роскосмос»: На МКС произошло повреждение обшивки космического корабля «Союз МС-22» // Военное обозрение. URL: <https://topwar.ru/206856-roskosmos-na-mks-proizoshlo-povrezhdenie-obshivki-kosmicheskogo-korablja-sojuz-ms-22.html> (дата обращения: 20.10.2023).
11. Блинов В. Н., Шалай В. В., Зубарев С. И. [и др.]. Исследования электротермических микродвигателей корректирующих двигательных установок маневрирующих малых космических аппаратов: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 263 с. ISBN 978-5-8149-1710-2.
12. Анищук Е. К., Гематудинов Р. А. Маневрирование космических аппаратов // E-Scio. 2021. № 3 (54). С. 112–120. EDN: QEFOGN.
13. Lev D. Heated Gas Propulsion System Conceptual Design for the SAMSON Nano-Satellite (Propulsion) // Journal of Small Satellites. 2017. Vol. 6, no. 1. P. 551–564.
14. Lemmer K. Propulsion for CubeSats // Acta Astronautica. 2017. Vol. 134. P. 231–243. DOI: 10.1016/J.ACTAASTRO.2017.01.048.
15. Газовые двигатели. URL: <https://spacepi.space/wiki/article/gazovye-dvigateli> (дата обращения: 28.10.2023).
16. ГОСТ 25645.301-83. Расчеты баллистические искусственных спутников Земли. Методика расчета затрат топлива на маневр. Введ. 1995–01–01. Москва: Изд-во стандартов, 1984. 148 с.
17. Нариманова Г. С., Тихонравова М. К. Основы теории полета космических аппаратов. Москва: Машиностроение, 1972. 608 с.
18. Корн Г., Корн Т. Справочник по высшей математике для научных работников и инженеров. Москва: Наука, 1973. 832 с.

РУБАН Виктор Иванович, старший научный сотрудник НИИ «Двигательные установки микротяги малых космических аппаратов» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 9889-2810

AuthorID (РИНЦ): 723703

AuthorID (SCOPUS): 56503331600

Адрес для переписки: rubanvictor@rambler.ru

БЛИНОВ Виктор Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 8934-4313

AuthorID (РИНЦ): 530029

AuthorID (SCOPUS): 56503115200

ORCID: 0000-0002-9309-4610

Адрес для переписки: blinovvictor@yandex.ru

КОСИЦЫН Валерий Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 8766-8891

AuthorID (РИНЦ): 723680

AuthorID (SCOPUS): 56503934600

Адрес для переписки: valera_kositsin@mail.ru

ЛУКЬЯНЧИК Антон Игоревич, старший преподаватель кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2378-9723

AuthorID (РИНЦ): 798228

AuthorID (SCOPUS): 57189506536

ORCID: 0000-0002-3309-4125

ResearcherID: O-8722-2016

Адрес для переписки: lukyanchik1991@mail.ru



ЯЧМЕНЕВ Павел Сергеевич, старший преподаватель кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4744-0940

AuthorID (РИНЦ): 812493

ORCID: 0000-0003-3483-4321

AuthorID (SCOPUS): 57193405041

ResearcherID: P-5381-2016

Адрес для переписки: yachmenev-pavel@mail.ru

СТЕПЕНЬ Павел Валерьевич, старший преподаватель кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4322-5980

AuthorID (РИНЦ): 1004744

AuthorID (SCOPUS): 57222345428

Адрес для переписки: stepen2@mail.ru

Для цитирования

Рубан В. И., Блинов В. Н., Косицын В. В., Лукьянчик А. И., Ячменев П. С., Степень П. В. Построение траектории малого космического аппарата для облета базового космического аппарата с целью наружного осмотра и оценка энергетических затрат на маневр облета // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 4. С. 56–64. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-56-64.

Статья поступила в редакцию 13.10.2023 г.

© В. И. Рубан, В. Н. Блинов,

В. В. Косицын, А. И. Лукьянчик,

П. С. Ячменев, П. В. Степень

CONSTRUCTING THE TRAJECTORY OF A SMALL SPACECRAFT FOR FLYING AROUND THE BASE SPACECRAFT FOR THE PURPOSE OF EXTERNAL INSPECTION AND ESTIMATING THE ENERGY COSTS FOR THE FLYBY MANEUVER

V. I. Ruban, V. N. Blinov, V. V. Kositsyn, A. I. Lukyanchik,
P. S. Yachmenev, P. V. Stepen

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The paper presents a methodology for constructing a flyby trajectory of a base spacecraft for the purpose of inspecting it using a small spacecraft carried on board and estimating the required characteristic velocity reserves for the flyby maneuver. The use of approximate calculation methods made it possible to obtain the simplest dependences of trajectory parameters with high accuracy. The technique allows not only to estimate the energy costs for orbital maneuvers, but also allows one to calculate the values of control impulses for the real problem of controlling the motion of a small spacecraft relative to the base spacecraft.

Keywords: small spacecraft, basic spacecraft, flyby trajectory, orbit, flyby maneuver.

Acknowledgments

The work is carried out with the financial support of Omsk State Technical University, internal research work No. 23090B «Theoretical and experimental studies of prototypes of pulse propulsion systems for nanosatellites» within the framework of the Priority-2030 development program.

References

1. Katkalov V. B. Kosmicheskiye uslugi i operatsii: sostoyaniye i perspektivy [Space services and operations. State and prospects] // *Vozdushno-Kosmicheskaya Sfera. Aerospace Sphere Journal*. 2020. No. 2 (103). P. 72–80. DOI: 10.30981/2587-7992-2020-103-2-72-80. (In Russ.).
2. Gnezdova E. K. Ballisticheskiy analiz metodik planirovaniya poleta kosmicheskogo apparata, osushchestvlyayushchego inspektsiyu gruppy ob'yektov na geostatsionarnoy orbite [Ballistic analysis of flight planning techniques of a spacecraft carrying out an inspection of a group of objects in geostationary orbit] // *Politekhniicheskiy Molodezhnyy Zhurnal. Politechnical Student Journal*. 2018. No. 11. P. 1–9. DOI: 10.18698/2541-8009-2018-11-404. EDN: YPVEYP. (In Russ.).
3. Hastings D. E., Putbrese B. L., La Tour P. A. When will on-orbit servicing be part of the space enterprise? // *Acta Astronautica*. 2016. Vol. 127. P. 655666. DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.07.007. (In Engl.).
4. Razoumny Y., Razoumny V., Kozlov P. [et al.]. Method of optimization of the servicing space-based system orbits and detached units maneuvers parameters in the problem of on-orbit-servicing of the given multi-satellite space infrastructure // *Making Space Accessible and Affordable to all Countries, Guadalajara*. 2016. EDN: YVLZHL. (In Engl.).
5. Pozdnyakov A. Yu., Skopintseva L. M., Gnezdova E. K. [et al.]. Analiticheskiye issledovaniya variantov organizatsii inspektsii kosmicheskikh apparatov v oblasti GSO [Analytical studies of options for organizing the inspection of spacecraft in the field of GSO] // *Aktual'nyye Voprosy Razvitiya Vooruzheniya,*

Voyennoy i Spetsial'noy Tekhniki Voysk Protivovozdushnoy i Protivoraketnoy Oborony, Kosmicheskikh Voysk Vozdushno-Kosmicheskikh Sil. Current Issues in the Development of Weapons, Military and Special Equipment of the Air and Missile Defense Forces, Space Forces of the Aerospace Forces. Moscow, 2017. P. 291–297. EDN: YPIKRX. (In Russ.).

6. Sachuk D. V., Uperchuk R. A. Raschet ballisticheskikh kharakteristik orbital'nogo dvizheniya apparata-inspektora [Calculation of ballistic characteristics of the orbital motion of the inspector vehicle] // *Prioritetnyye Napravleniya Innovatsionnoy Deyatel'nosti v Promyshlennosti. Priority Areas of Innovation in Industry*. 2020. Vol. 52, no. 4. P. 236–237. EDN: RFSFTF. (In Russ.).

7. Averianov A. V. Analiticheskiy metod rascheta dvizheniya malogo kosmicheskogo apparata, svyazannogo s bazovym kosmicheskim apparatom [Analytical method for calculating the motion of a small spacecraft associated with a basic spacecraft] // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. Journal of Instrument Engineering*. 2009. Vol. 52, no. 4. P. 75–77. EDN: KLRWTZ. (In Russ.).

8. Egorov Yu. G., Kurguzov A. V., Chernyshov A. N. O gruppovom polete MKA v khode kosmicheskogo eksperimenta «Inspektor-MKA» [About the group flight of the MKA during the space experiment «Inspector-MKA»] // *Nauchnoye Naslediye i Razvitiye Idey K. E. Tsiolkovskogo. Scientific Heritage and Development of Ideas of K. E. Tsiolkovsky*. 2019. Vol. 1. P. 93–94. EDN: AGDILD. (In Russ.).

9. Radhakrishnan R., Edmonson W., Afghah F. [et al.]. Survey of inter-satellite communication for small satellite systems: Physical layer to network layer view // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. Vol. 18, no. 4. P. 2442–2473. DOI: 10.1109/COMST.2016.2564990. (In Engl.).

10. «Roskosmos»: Na MKS proizoshlo povrezhdeniye obshivki kosmicheskogo korablya «Soyuz MS-22» [Roscosmos: Damage to the skin of the Soyuz MS-22 spacecraft occurred on the ISS] // *Voyennoye obozreniye. Top War*. URL: <https://topwar.ru/206856-roskosmos-na-mks-proizoshlo-povrezhdenie-obshivki-kosmicheskogo-korablya-soyuz-ms-22.html> (accessed: 20.10.2023). (In Russ.).

11. Blinov V. N., Shalay V. V., Zubarev S. I. [et al.]. Issledovaniya elektrotermicheskikh mikrodvigateley korrektruyushchikh dvigatel'nykh ustanovok manevriruyushchikh malykh kosmicheskikh apparatov [Research of electrothermal micromotors for corrective propulsion systems of maneuvering small spacecraft]. Omsk, 2014. 263 p. ISBN 978-5-8149-1710-2. (In Russ.).

12. Anishchuk E. K., Gematudinov R. A. Manevrirovaniye kosmicheskikh apparatov [Maneuvering spacecraft] // *E-Scio. E-Scio*. 2021. No. 3 (54). P. 112–120. EDN: QEFOGN. (In Russ.).

13. Lev D. Heated Gas Propulsion System Conceptual Design for the SAMSON Nano-Satellite (Propulsion) // *Journal of Small Satellites*. 2017. Vol. 6, no. 1. P. 551–564. (In Engl.).

14. Lemmer K. Propulsion for CubeSats // *Acta Astronautica*. 2017. Vol. 134. P. 231–243. DOI: 10.1016/J.ACTAASTRO.2017.01.048. (In Engl.).

15. Gazovyye dvigateli [Gas engine]. URL: <https://spacepi.space/wiki/article/gazovyye-dvigateli> (accessed: 28.10.2023). (In Russ.).

16. GOST 25645.301-83. Raschety ballisticheskoye iskusstvennykh sputnikov Zemli. Metodika rascheta zatrat topliva na manevr [Ballistic calculations of artificial Earth satellites. Methodology for calculating fuel costs for a maneuver]. Moscow, 1984. 148 p. (In Russ.).

17. Narimanova G. S., Tikhonravova M. K. Osnovy teorii poleta kosmicheskikh apparatov [Fundamentals of spacecraft flight theory]. Moscow, 1972. 608 p. (In Russ.).

18. Korn G., Korn T. Spravochnik po vysshey matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Handbook of Higher Mathematics for researchers and engineers]. Moscow, 1973. 832 p. (In Russ.).

RUBAN Victor Ivanovich, Senior Researcher at Small Spacecraft Microthrusters Research Laboratory, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 9889-2810

AuthorID (RSCI): 723703

AuthorID (SCOPUS): 56503331600

Correspondence address: rubanvictor@rambler.ru

BLINOV Viktor Nikolayevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Aircraft and Rocket Building Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 8934-4313

AuthorID (RSCI): 530029

AuthorID (SCOPUS): 56503115200

ORCID: 0000-0002-9309-4610

Correspondence address: blinovvictor@yandex.ru

KOSITSIN Valeriy Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Aircraft and Rocket Building Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 8766-8891

AuthorID (RSCI): 723680

AuthorID (SCOPUS): 56503934600

Correspondence address: valera_kositsin@mail.ru

LUKYANCHIK Anton Igorevich, Senior Lecturer of Aircraft and Rocket Building Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2378-9723

AuthorID (RSCI): 798228

AuthorID (SCOPUS): 57189506536

ORCID: 0000-0002-3309-4125

ResearcherID: O-8722-2016

Correspondence address: lukyanchik1991@mail.ru

YACHMENEV Pavel Sergeevich, Senior Lecturer of Aircraft and Rocket Building Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 4744-0940

AuthorID (RSCI): 812493

AuthorID (SCOPUS): 57193405041

ORCID: 0000-0003-3483-4321

ResearcherID: P-5381-2016

Correspondence address: yachmenev-pavel@mail.ru

STEPEN Pavel Valer'yevich, Senior Lecturer of Aircraft and Rocket Building Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 4322-5980

AuthorID (RSCI): 1004744

AuthorID (SCOPUS): 57222345428

Correspondence address: stepen2@mail.ru

For citations

Ruban V. I., Blinov V. N., Kositsyn V. V., Lukyanchik A. I., Yachmenev P. S., Stepen P. V. Constructing the trajectory of a small spacecraft for flying around the base spacecraft for the purpose of external inspection and estimating the energy costs for the flyby maneuver // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2023. Vol. 7, no. 4. P. 56–64. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-56-64.

Received October 13, 2023.

© V. I. Ruban, V. N. Blinov, V. V. Kositsyn, A. I. Lukyanchik, P. S. Yachmenev, P. V. Stepen

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ALSi10MG, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ СЛС

Е. П. Злобин, А. И. Хаймович, А. В. Балякин

Самарский университет,
Россия, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34

Представлены результаты эксперимента, целью которого являлось изучение влияния вибрационной обработки на образцы различных размеров из сплава ALSi10Mg, полученных селективным лазерным сплавлением. В ходе исследования производился контроль изменения шероховатости и скругления острых кромок в зависимости от размера образцов и угла наклона стенки. Также было изучено формирование зон пониженного контакта и необработанных зон во время обработки. В результате эксперимента была достигнута минимальная шероховатость поверхности образцов Ra 1,2 мкм. Длина необработанных зон в зависимости от геометрии варьировалась в диапазоне от 0,5 мм до 6 мм. Скругление происходило наиболее эффективно в первые 4 часа обработки на кромках, образованных тупым углом. Полученные результаты позволяют лучше понять особенности вибрационной обработки изделий из алюминиевых сплавов и оптимизировать процесс для достижения требуемых характеристик поверхности. Таким образом, результаты исследования могут быть полезны для различных промышленных секторов, где используются алюминиевые сплавы, и могут способствовать дальнейшему развитию технологий обработки изделий, полученных с помощью технологии селективного лазерного сплавления.

Ключевые слова: постобработка, селективное лазерное сплавление, галтовка, вибрационная обработка, поверхностный слой.

Аддитивные технологии, также известные как 3D-печать, представляют собой процесс создания трехмерных изделий путем последовательного нанесения материала слой за слоем. В последнее время такие технологии всё чаще внедряются в современное производство различных машиностроительных предприятий. Обусловлено это тем, что с помощью 3D-печати возможно создавать сложные детали и объекты с высокой точностью за относительно короткое время. Это позволяет сократить время и затраты на проектирование и производство, а также ускорить цикл разработки новых продуктов. Но в то же время аддитивные технологии имеют некоторые ограничения. Среди прочего, одним из основных недостатков является качество поверхностного слоя, получаемое после печати.

Исследование процесса обработки алюминиевых сплавов является актуальной темой в связи с их широким применением в различных отраслях промышленности, таких как авиационная, автомобильная, ракетная, энергетическая и другие [1–3]. Как и в остальных случаях, изделия, получаемые из алюминиевых сплавов с помощью технологии селективного лазерного сплавления (СЛС), зачастую нуждаются в постобработке из-за высоких требований к качеству поверхностей.

Одним из эффективных методов снижения шероховатости является обработка свободным абразивом, в частности виброгалтовка [4]. Данная обработка позволяет осуществлять широкий спектр работ, таких как удаление дефектного слоя, окалины, ржавчины, заусенцев, скругление острых кромок.

С помощью её применения достигается повышение качества готовой продукции путем полировки поверхностей и доведение их до необходимых требований.

Выбор виброгалтовки для улучшения шероховатости поверхности изделий после селективного лазерного сплавления обусловлен следующими факторами:

- эффективность: виброгалтовка является высокоэффективным процессом, так как позволяет одновременно обрабатывать большое количество деталей, значительно сокращает время обработки и затраты на постобработку;

- качество обработки: виброгалтовка позволяет достичь высокого качества поверхности. Этот метод позволяет удалить дефектный слой после выращения и значительно улучшить шероховатость (при финишном полировании до Ra 0,4 мкм);

- универсальность: виброгалтовка может использоваться для обработки различных материалов, включая различные виды металла и керамику. Это делает ее универсальным и гибким методом обработки поверхностей изделий;

- безопасность: в отличие от других методов, таких как лазерная, химическая, электрохимическая обработка, виброгалтовка не требует использования агрессивных химических веществ или высоких температур, что делает ее более безопасной для оператора и окружающей среды [5, 6].

Селективное лазерное сплавление обладает значительным потенциалом, поскольку позволяет создавать детали сложной геометрии, обладающей

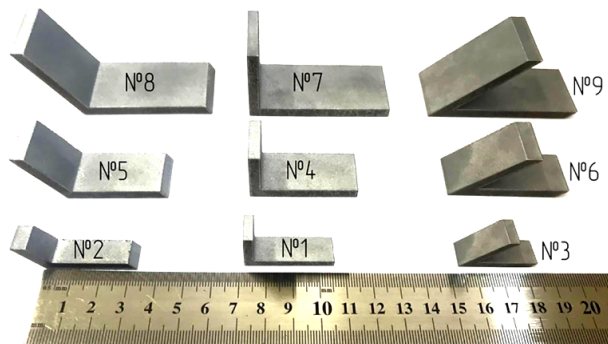


Рис. 1. Изготовленные образцы для проведения эксперимента
Fig. 1. Printed samples for the experiment

труднодоступными местами [7–9]. Такие конструкционные элементы не во всех случаях удастся обработать виброгалтовкой, поэтому необходимо максимально изучить возможности этого метода и определить возникающие ограничения, чтобы в дальнейшем прогнозировать результаты уже применительно к реальным изделиям [10].

В данной статье была рассмотрена обработка образцов различного размера из сплава AlSi10Mg, полученных методом СЛС [11]. Целью исследования являлось изучение влияния виброгалтовки на шероховатость и скругление острых кромок в зависимости от размера образцов и угла наклона стенки, с последующим определением величины образования зоны пониженного контакта и необработанной зоны.

Описание эксперимента

Объектом исследования стали образцы трёх размеров, с различным наклоном стенок 120°, 90° и 45° (рис. 1). Печать производилась на комплексе селективного лазерного сплавления M350 производства компании «Лазерные системы» на следующих режимах: шаг — 190 мкм, скорость — 930 мм/с, мощность — 350 Вт [12].

Образцы выполнены из алюминиевого сплава AlSi10Mg. Материал можно подвергать механической обработке, электроэрозионной обработке, сварке, обработке микродробью, полировке и, при необходимости, наносить покрытие [13]. Химический состав материала AlSi10Mg представлен в табл. 1.

Шероховатость поверхности до и после каждого этапа обработки определялась с помощью профилометра «Восток-7» ИШП-210. Контроль скругления острых кромок производился на микроскопе AmScope ME 1400TC-INF. Затем полученное изображение обрабатывалось в программе КОМПАС-3D путем наложения на него линейки. В силу особенностей технологии при печати острых граней методом селективного лазерного сплавления появляется небольшой радиус скругления острых кромок [14]. Результаты контролируемых параметров до начала обработки представлены в табл. 2.

Для контроля необработанной зоны и зоны пониженного контакта на поверхность образцов было нанесено специальное покрытие, благодаря которому после обработки можно было определить значение этих величин.

Для проведения данного исследования использовалась галтовочная вибромашина AVALON WR60 mini, предназначенная для шлифовки и полировки различных деталей из металла, керамики и пластика [15]. Обработка проводилась на следующих режимах: 1 этап — вид абразива — конус 10×10 мм, пластиковые для черновой обработки, частота обработки — 1650 об/мин, время экспозиции — 2 часа, интенсивность подачи СОЖ — 100 %. 2 этап — вид абразива — конус 10×10 мм, пластиковые для черновой обработки, частота обработки — 1950 об/мин, время экспозиции — 10 часов, интенсивность подачи СОЖ — 20 % [16]. В качестве вспомогательной жидкости использовался универсальный компаунд SK6 — химическая добавка с концентрацией ионов водорода pH 7,0, которая предназначена для удаления заусенцев, шлифовки изделий из металла. Рабочий раствор представляет собой смесь компаунда и воды в соотношении 2:100. Это оптимальная

Таблица 1. Процентное содержание химических элементов в материале AlSi10Mg
Table 1. Percentage of chemical elements in the AlSi10Mg material

Al	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Cr	Ni	Zn	Pb	Ti	Sn
Основа	9–11	0,2–0,45	0,55	0,05	0,45	2,0	0,05	0,1	0,05	0,15	0,05

Таблица 2. Результаты измерения контролируемых параметров перед началом обработки
Table 2. Measurement results of controlled parameters before processing

№ образца	Габариты, мм	Угол наклона стенки, °	Радиус скругления, мм	Шероховатость плоской поверхности, мкм
1	35×10×15	90	0,50	6,4
2	35×10×15	120	0,68	6,8
3	35×10×15	45	0,34	6,2
4	45×20×25	90	0,50	6,5
5	45×20×25	120	0,68	7,3
6	45×20×25	45	0,34	5,9
7	65×30×35	90	0,50	6,4
8	65×30×35	120	0,68	7,0
9	65×30×35	45	0,34	6,3

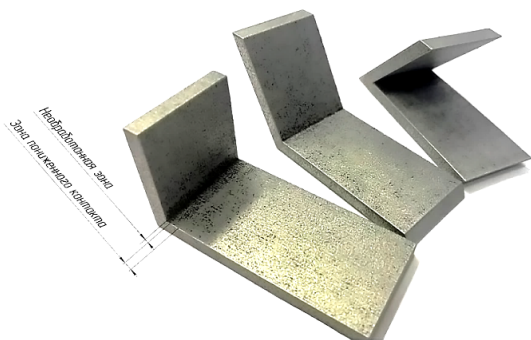


Рис. 2. Образцы после первого часа
вибрационной обработки
Fig. 2. Samples after the first hour of vibration treatment

Таблица 3. Результаты измерения труднодоступных зон
обработки
Table 3. Measurement results of hard-to-reach treatment
surfaces

№ образ-ца	Габа-риты, мм	Угол наклона стенки, °	Длина необра-ботанной зоны, мм	Длина зоны пони-женного контакта, мм
1	35×10×15	90	0,5	4,0
2	35×10×15	120	0,5	2,5
3	35×10×15	45	6,0	10,0
4	45×20×25	90	0,5	4,0
5	45×20×25	120	0,5	2,5
6	45×20×25	45	6,0	10,0
7	65×30×35	90	0,5	4,0
8	65×30×35	120	0,5	2,5
9	65×30×35	45	6,0	10,0

рабочая вспомогательная жидкость в современных технологиях галтования. Благодаря способности отчистки загрязнений детали и абразивные тела остаются чистыми, а поверхность оптимальной подготовленной для шлифования и полирования в галтовочных процессах. При этом сам процесс полирования становится не только механическим, но и химическим.

Результаты эксперимента

После первого часа обработки стало возможным измерение зон, на которые абразивные тела воздействуют в меньшей степени или не воздействуют совсем. На таких зонах осталось покрытие или его часть, длина которого измерялась с помощью штангенциркуля (рис. 2).

Итоговые результаты измерений труднодоступных зон обработки представлены в табл. 3. Результаты данных параметров оставались неизменными на протяжении всей обработки. Как можно заметить, длина необработанной зоны на образцах с наклоном стенки 90° и 120° приблизительно равна радиусу скругления кромок галтовочного тела. Размер труднодоступной зоны образцов с наклоном стенки 45° значительно больше, так как габариты и конусность абразивного тела не позволяют проникнуть ему в угловую часть (рис. 3).

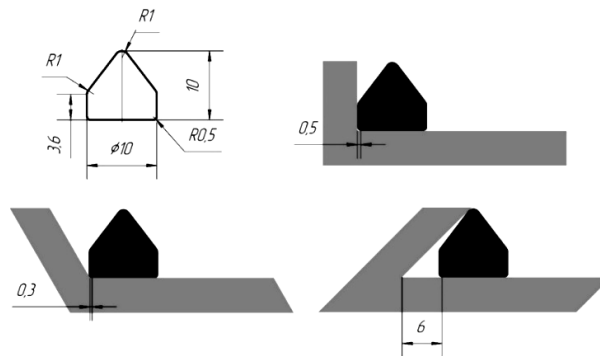


Рис. 3. Образование необработанных зон
при вибрационной обработке
Fig. 3. Formation of untreated zones during vibration treatment

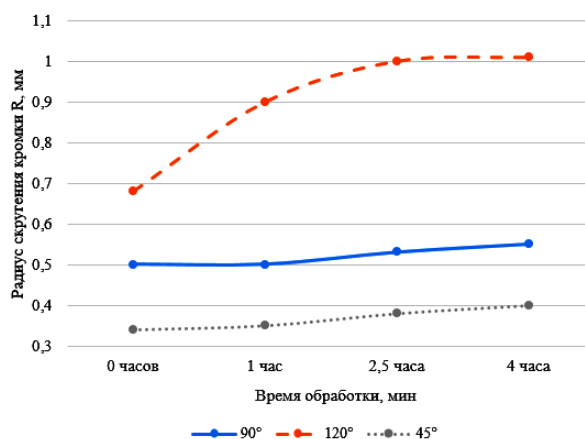


Рис. 4. График скругления острой кромки
Fig. 4. Graph of the rounding of the sharp edge

При обработке угловых элементов изделий любым абразивом будут образовываться такие зоны, так как даже галтовочное тело с идеально острой гранью, которая может обработать угол, в процессе галтования начнет изнашиваться и скруглит свою же кромку [17]. Результаты измерения скругления кромок образцов представлены на графиках (рис. 4).

Вне зависимости от размера образца скругление кромок, образованной одинаковыми углами, происходило приблизительно одинаково. Измерения производились только на протяжении первых 4 часов обработки, так как в дальнейшем данная величина меняется незначительно. Происходит это из-за того, что основной припуск с образцов снимается в первые часы обработки. Из графика видно, что скругление угла 120° происходит заметно эффективнее, чем на углах 45° и 90°. Связано это с тем, что галтовочные тела имеют большую зону контакта и возможность дольше задерживаться на поверхности образца при обработке тупого угла, в отличие от прямого и острого. Результаты измерения шероховатости поверхностей образцов представлены в виде графиков на рис. 5.

После анализа представленных графиков (рис. 5) можно сделать вывод о том, что наиболее заметное снижение шероховатости наблюдается в течение первых 4 часов обработки, а на образцах большего размера данный процесс протекает эффективнее. Угол наклона стенки незначительно влияет на результат, но, как было замечено ранее, от него напрямую зависит величина необработан-

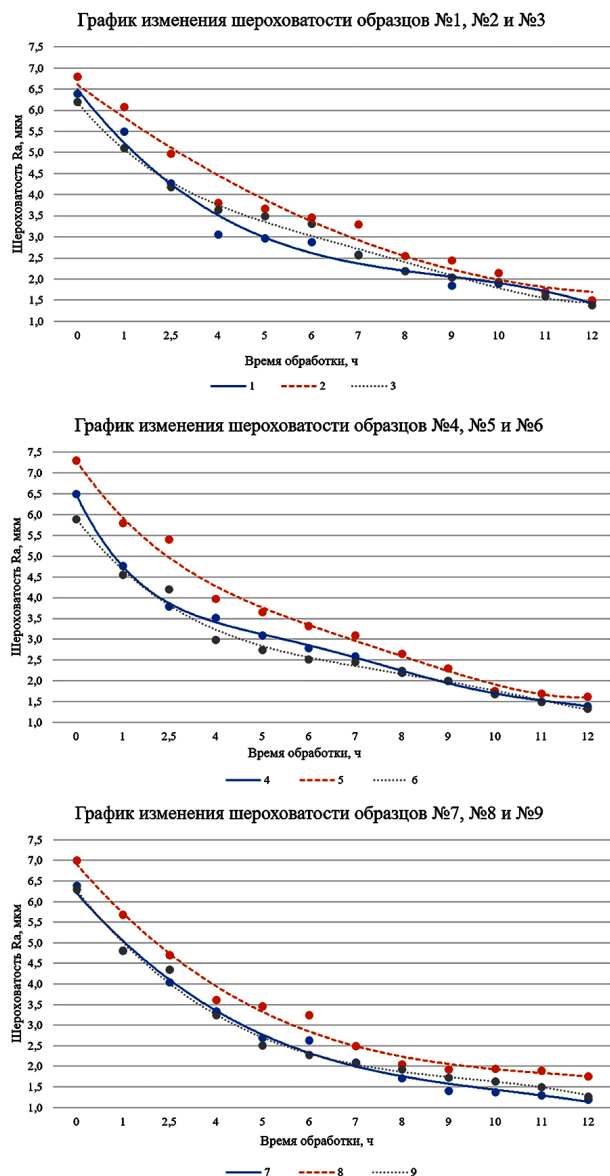


Рис. 5. График изменения шероховатости образцов из сплава AlSi10Mg во время вибрационной обработки
Fig. 5. Graph of changes in the roughness of AlSi10Mg alloy samples during vibration treatment

ной зоны. В последующие 8 часов обработки происходит менее интенсивное, но стабильное улучшение качества поверхности. Наилучшее значение, которое удалось достигнуть за 12 часов обработки, — Ra 1,2 мкм на образце № 7, что приблизительно равно минимально возможной шероховатости, которую можно получить при черновой шлифовке пластиковыми телами. Стоит отметить, что конечная шероховатость напрямую зависит от её начального значения, полученного после печати. Впервые удалось достигнуть настолько низкой шероховатости и максимально избавиться от дефектного слоя на поверхности образцов, полученных с помощью технологии СЛС. Можно сделать предположение о том, что и для других изделий из более твердых материалов, возможно достижение таких показателей чистоты поверхности после вибрационной обработки. Однако необходимо учесть различные факторы, такие как продолжительность процесса и уровень абразивности галтовочных тел, применяемых в данной операции.

Выводы по результатам эксперимента

После проведения эксперимента можно сделать некоторые выводы:

1. Вибрационная обработка в свободном абразиве является эффективным методом для шлифования изделий из алюминиевого сплава AlSi10Mg, полученных методом селективного лазерного сплавления. Этот способ позволяет достичь высокого качества поверхности и существенно снижает шероховатость изделия (с $\approx$ Ra 6,5 мкм до $\approx$ Ra 1,2 мкм после черновой обработки).
2. Значительное изменение шероховатости наблюдается в течение первых четырех часов обработки, после чего становится менее интенсивным. Несмотря на это, непрерывное улучшение качества поверхности сохраняется на протяжении всех 12 часов.
3. Длина необработанной зоны может быть спрогнозирована до обработки, так как она напрямую зависит от геометрии галтовочного тела. Полностью избежать образования таких зон невозможно, но их минимизацию можно достичь путем оптимального подбора тел на основе геометрических особенностей изделия.
4. Скругление острой кромки в значительной мере происходит в первые 4 часа обработки и эффективнее данный процесс на тупых углах.
5. Масса и габариты изделия влияют на качество обработки: чем выше эти параметры, тем эффективнее процесс.

Благодарности

Работы выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме: «Организация высокотехнологичного производства промышленных ГТД с интеллектуальной системой конструкторско-технологической подготовки для повышения функциональных характеристик» (Соглашение о предоставлении гранта № 075-11-2021-042 от 24.06.2021 г.).

Список источников

1. Антипов В. В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 186–194. DOI 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194. EDN: YRVMAP.
2. Баженова Н. Н. Исследование проблем обработки алюминия // Молодой ученый. 2017. № 7 (141). С. 38–40. URL: <https://moluch.ru/archive/141/39585/> (дата обращения: 19.07.2023).
3. Павловская Т. Г., Волков И. А., Козлов И. А. [и др.]. Экологически улучшенная технология обработки поверхности алюминиевых сплавов // Труды ВИАМ. 2016. № 7 (43). С. 2. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-2-2. EDN: WEIYOR.
4. Boban J., Ahmed A., Jithinraj E. K. [et al.]. Polishing of additive manufactured metallic components: retrospect on existing methods and future prospects // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Vol. 121. P. 83–125. DOI: 10.1007/s00170-022-09382-y.
5. Basha M. M., Basha S. M., Jain V. K. [et al.]. State of the art on chemical and electrochemical based finishing processes for additive manufactured features // Additive Manufacturing. 2022. Vol. 58. 103028. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103028.
6. Jingsi W., Jiaqi Z., Jun P. [et al.]. Material Removal in Ultrasonic Abrasive Polishing of Additive Manufactured

Components // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. 5359. DOI: 10.3390/app9245359.

7. Елисеев Ю. С., Федорченко Д. Г., Голанов С. П. [и др.]. Применение аддитивной технологии селективного лазерного сплавления в конструкции малоэмиссионной камеры сгорания газотурбинной установки // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 1. С. 174–183. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-174-183.

8. Кузнецов П. А., Васильева О. В., Теленков А. И. [и др.]. Аддитивные технологии на базе металлических порошковых материалов для российской промышленности // Новости материаловедения. Наука и техника. 2015. № 2 (14). С. 4–10. EDN: TONSTL.

9. Балякин А. В., Олейник М. А., Злобин Е. П. [и др.]. Обзор гибридного аддитивного производства металлических деталей // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21, № 2. С. 48–64. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-2-48-64. EDN: NOVEUV.

10. Щелокова П. Ю., Беляков Н. В. Основные проблемы назначения режимных параметров роторной галтовки металлических изделий в условиях серийного и мелкосерийного производства // Политехнический молодежный журнал МГТУ имени Н. Э. Баумана. 2017. № 3 (8). С. 10. DOI: 10.18698/2541-8009-2017-3-90. EDN: YKVZLX.

11. Агаповичев А. В., Хаймович А. И., Кокарева В. В. [и др.]. Определение рациональных технологических параметров селективного лазерного сплавления порошка алюминиевого сплава AlSi10Mg // Перспективные материалы. 2021. № 10. С. 65–73. DOI: 10.30791/1028-978X-2021-10-65-73. EDN: YWDDLY.

12. Трасковецкая Д. В. Конференция IX Конгресса Технологической платформы РФ «Фотоника»: «Лазерные производственные технологии» // Фотоника. 2021. Т. 15, № 2. С. 122–131. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.2.122.129. EDN: JBBKUK.

13. Караваев А. К., Пучков Ю. А. Исследование структуры и свойств сплава AlSi10Mg, полученного методом селективного лазерного сплавления // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2020. № 5 (134). С. 71–85. DOI: 10.18698/0236-3941-2020-5-71-85. EDN: MZEWKF.

14. Matache G., Vladut M., Paraschiv A. [et al.]. Edge and corner effects in selective laser melting of IN 625 alloy // Manufacturing Review. 2020. Vol. 7. 8. DOI: 10.1051/mfreview/2020008.

15. Грахольский А. А. Виброгалтовка как метод подготовки изделий под покрытие // Инженерные кадры — будущее инновационной экономики России. 2019. № 1. С. 46–49. EDN: SQPWAQ.

16. Злобин Е. П., Хаймович А. И., Гончаров Е. С., Балякин А. В. Влияние технологических параметров вибрационной обработки на качество изделий, изготовленных по технологии селективного лазерного сплавления // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 6 (144). С. 38–48. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-38-48. EDN: CTSCML.

17. Артемов И. И., Зверовщиков А. Е., Мартынов А. Н. Формирование качества поверхностных слоев деталей при изменении характеристик рабочих тел для центробежно-планетарной объемной обработки // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2013. № 4 (28). С. 199–211. EDN: RZTRMT.

ЗЛОБИН Евгений Петрович, аспирант кафедры технологий производства двигателей Самарского университета, г. Самара.

SPIN-код: 2272-0867

AuthorID (РИНЦ): 1146832

ORCID: 0000-0001-8419-7653

Адрес для переписки: ep.smr@mail.ru

ХАЙМОВИЧ Александр Исаакович, доктор технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой технологий производства двигателей Самарского университета, г. Самара.

SPIN-код: 9966-4603

AuthorID (РИНЦ): 463931

ORCID: 0000-0002-9935-5703

Адрес для переписки: berill_samara@bk.ru

БАЛЯКИН Андрей Владимирович, старший преподаватель кафедры технологий производства двигателей Самарского университета, г. Самара.

SPIN-код: 2614-5059

AuthorID (РИНЦ): 728883

ORCID: 0000-0002-1558-1034

Адрес для переписки: balaykinav@ssau.ru

Для цитирования

Злобин Е. П., Хаймович А. И., Балякин А. В. Влияние вибрационной обработки на шероховатость и геометрические характеристики изделий из алюминиевого сплава AlSi10Mg, полученных с помощью технологии СЛС // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 4. С. 65–71. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-65-71.

Статья поступила в редакцию 08.09.2023 г.

© Е. П. Злобин, А. И. Хаймович, А. В. Балякин



INVESTIGATION OF THE PROCESS OF VIBRATION PROCESSING OF ALSI10MG ALUMINUM ALLOY SAMPLES OBTAINED BY SLS TECHNOLOGY

E. P. Zlobin, A. I. Khaimovich, A. V. Balyakin

Samara University,
Russia, Samara, Moskovskoye shosse, 34, 443086

The results of the experiment aimed at studying the effect of vibration treatment on samples of various sizes made of AlSi10Mg alloy obtained by selective laser melting are presented. During the investigation, changes in the roughness and rounding of sharp edges are monitored depending on the size of the samples and the angle of inclination of the wall. Also, the formation of low contact zones and untreated zones during processing is studied. As a result of the experiment, a minimum surface roughness of Ra 1,2 microns is achieved. The length of the untreated zones, depending on the geometry, ranged from 0,5 mm to 6 mm. Rounding occurred most effectively in the first 4 hours of processing on the edges formed by an obtuse angle. The results obtained allow us to better understand the features of vibration processing of aluminum alloy products and optimize the process to achieve the required surface characteristics. Thus, the results of the study can be useful for various industrial sectors where aluminum alloys are used, and contribute to the further development of processing technologies for products obtained using SLM technology.

Keywords: post-processing, selective laser melting, barrel finishing, vibration treatment, surface layer.

Acknowledgments

The work is carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of Russia as part of the implementation of a comprehensive project to create a high-tech production on the topic: "Organization of high-tech production of industrial gas turbine engines with an intellectual system of design and technological training to improve functional characteristics" (Grant Agreement No. 075-11-2021-042 dated 24.06.2021).

References

1. Antipov V. V. Perspektivy razvitiya alyuminiyevykh, magniyevykh i titanovykh splavov dlya izdeliy aviatsionno-kosmicheskoy tekhniki [Prospects for development of aluminium, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering] // *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii. Aviation Materials and Technologies*. 2017. No. S. P. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194. EDN: YRVMAP/ (In Russ.).
2. Bazhenova N. N. Issledovaniye problem obrabotki alyuminiya [Study of aluminium processing problems] // *Molodoy uchenyy. Young Scientist*. 2017. No. 7 (141). P. 38–40. URL: <https://moluch.ru/archive/141/39585/> (accessed: 19.07.2023). (In Russ.).
3. Pavlovskaya T. G., Volkov I. A., Kozlov I. A. [et al.]. Ekologicheskii uluchshennaya tekhnologiya obrabotki poverkhnosti alyuminiyevykh splavov [Ecologically improved technology of aluminum alloys surface treatment] // *Trudy VIAM. Proceedings of VIAM*. 2016. No. 7 (43). P. 2. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-2-2. EDN: WEIYOR. (In Russ.).
4. Boban J., Ahmed A., Jithinraj E. K. [et al.]. Polishing of additive manufactured metallic components: retrospect on existing methods and future prospects // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 121. P. 83–125. DOI: 10.1007/s00170-022-09382-y. (In Engl.).

5. Basha M. M., Basha S. M., Jain V. K. [et al.]. State of the art on chemical and electrochemical based finishing processes for additive manufactured features // *Additive Manufacturing*. 2022. Vol. 58. 103028. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103028. (In Engl.).
6. Jingsi W., Jiaqi Z., Jun P. [et al.]. Material Removal in Ultrasonic Abrasive Polishing of Additive Manufactured Components // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. 5359. DOI: 10.3390/app9245359. (In Engl.).
7. Elisseyev Yu. S., Fedorchenko D. G., Golanov S. P. [et al.]. Primeneniye additivnoy tekhnologii selektivnogo lazernogo splavlaniya v konstruktzii maloemissionnoy kamery sgoraniya gazoturbinnoy ustanovki [Application of additive technology of selective laser melting (SLM) in designing a low emission combustion chamber of a gas turbine plant] // *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye. Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 18, no. 1. P. 174–183. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-174-183. (In Russ.).
8. Kuznetsov P. A., Vasil'yeva O. V., Telenkov A. I. [et al.]. Additivnyye tekhnologii na baze metallicheskih poroshkovykh materialov dlya rossiyskoy promyshlennosti [Additive technology on based metal powder materials for Russian industry] // *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika. Material Science and Technology News*. 2015. No. 2 (14). P. 4–10. EDN: TONSTL. (In Russ.).
9. Balyakin A. V., Oleynik M. A., Zlobin E. P. [et al.]. Obzor gibridnogo additivnogo proizvodstva metallicheskih detaley [A review of hybrid additive manufacturing of metal parts] // *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye. Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 21, no. 2. P. 48–64. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-2-48-64. EDN: NOVEUV. (In Russ.).
10. Shchelokova P. Yu., Belyakov N. V. Osnovnyye problemy naznacheniya rezhimnykh parametrov rotornoy galtovki metallicheskih izdeliy v usloviyakh seriynogo i melkoseriynogo proizvodstva [Main problems in standard parameters allocation of

metalware rotary tumbling in series and small-series production] // Politehnicheskiy molodezhnyy zhurnal MGTU imeni N. E. Baumana. *Politechnical Student Journal of BMSTU*. 2017. No. 3 (8). P. 10. DOI: 10.18698/2541-8009-2017-3-90. EDN: YKVZLX. (In Russ.).

11. Agapovichev A. V., Khaymovich A. I., Kokareva V. V. [i dr.]. Opredeleniye ratsional'nykh tekhnologicheskikh parametrov selektivnogo lazernogo splavleniya poroshka alyuminiyevogo splava AlSi10Mg [Determination of optimal technological parameters of selective laser melting of AlSi10Mg aluminum alloy powder] // Perspektivnyye materialy. *Perspektivnye Materialy*. 2021. No. 10. P. 65–73. DOI: 10.30791/1028-978X-2021-10-65-73. EDN: YWDDLY. (In Russ.).

12. Traskovetskaya D. V. Konferentsiya IX Kongressa Tekhnologicheskoy platformy RF «Fotonika»: «Lazernyye proizvodstvennyye tekhnologii» [IX Congress of the Russian technology platform photonics: the conference laser industrial technologies] // Fotonika. *Photonics*. 2021. Vol. 15, no. 2. P. 122–131. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.2.122.129. EDN: JBBKUK. (In Russ.).

13. Karavayev A. K., Puchkov Yu. A. Issledovaniye struktury i svoystv splava AlSi10Mg, poluchennogo metodom selektivnogo lazernogo splavleniya [Investigating the structure and properties of the AlSi10Mg alloy manufactured by means of selective laser melting] // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. *Seriya Mashinostroyeniye. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 2020. No. 5 (134). P. 71–85. DOI: 10.18698/0236-3941-2020-5-71-85. EDN: MZEWKF. (In Russ.).

14. Matache G., Vladut M., Paraschiv A. [et al.]. Edge and corner effects in selective laser melting of IN 625 alloy // Manufacturing Review. 2020. Vol. 7. 8. DOI: 10.1051/mfreview/2020008. (In Engl.).

15. Grakhol'skiy A. A. Vibrogaltovka, kak metod podgotovki izdeliy pod pokrytiye [Vibroturning as a method of preparation of products for coating] // Inzhenernyye kadry — budushcheye innovatsionnoy ekonomiki Rossii. *Inzhenernyye Kadry — Budushcheye Innovatsionnoy Ekonomiki Rossii*. 2019. No. 1. P. 46–49. EDN: SQPWAQ. (In Russ.).

16. Zlobin E. P., Khaymovich A. I., Goncharov E. S., Balyakin A. V. Vliyaniye tekhnologicheskikh parametrov vibratsionnoy obrabotki na kachestvo izdeliy, izgotovlennykh po tekhnologii selektivnogo lazernogo splavleniya [The effect of vibration treatment technological parameters on the quality of products, manufactured by using selective laser fusion technology] // Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii. *Science Intensive*

Technologies in Mechanical Engineering. 2023. No. 6 (144). P. 38–48. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-38-48. EDN: CTSCML. (In Russ.).

17. Artemov I. I., Zverovshchikov A. E., Martynov A. N. Formirovaniye kachestva poverkhnostnykh sloyev detaley pri izmenenii kharakteristik rabochikh tel dlya tsentrobezhno-planetarnoy ob"yemnoy obrabotki [Forming the quality of surface coatings of workpieces in the course of changing characteristics of working media for three-axis centrifugal treatment] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskiye nauki. *University proceedings. Volga Region. Technical Sciences*. 2013. No. 4 (28). P. 199–211. EDN: RZTRMT. (In Russ.).

ZLOBIN Evgeny Petrovich, Graduate Student of Engine Production Technology Department, Samara University, Samara.

SPIN-code: 2272-0867

AuthorID (RSCI): 1146832

ORCID: 0000-0001-8419-7653

Correspondence address: ep.smr@mail.ru

KHAIMOVICH Alexander Isaakovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Engine Production Technology Department, Samara University, Samara.

SPIN-code: 9966-4603

AuthorID (RSCI): 463931

ORCID: 0000-0002-9935-5703

Correspondence address: berill_samara@bk.ru

BALYAKIN Andrey Vladimirovich, Senior Lecturer of Engine Production Technology Department, Samara University, Samara.

SPIN-code: 2614-5059

AuthorID (RSCI): 728883

ORCID: 0000-0002-1558-1034

Correspondence address: balaykinav@ssau.ru

For citations

Zlobin E. P., Khaimovich A. I., Balyakin A. V. Investigation of the process of vibration processing of AlSi10Mg aluminum alloy samples obtained by SLS technology // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2023. Vol. 7, no. 4. P. 65–71. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-65-71.

Received September 08, 2023.

© E. P. Zlobin, A. I. Khaimovich, A. V. Balyakin



АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДИЛАТОМЕТРИЧЕСКОГО МИКРОДВИГАТЕЛЯ С ПОЛИМЕРНЫМИ РАБОЧИМИ КОМПОНЕНТАМИ

М. В. Смагин, Е. Е. Колягин, И. С. Вавилов

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

В работе представлены первичные результаты разработок и исследований авторов в области реактивных корректирующих микроракетных двигателей на холодном газе. Особенностью конструкции данного микродвигателя является использование дилатометрического полимерного привода в качестве регулятора работы отсечного клапана. В статье описано устройство дилатометрического микродвигателя. На основе сконструированного прототипа двигателя, в условиях вакуума, было проведено исследование работоспособности устройства при низком энергопотреблении. Результаты экспериментов показали, что при давлении рабочей газовой смеси на входе в двигатель в 101325 Па и массовом расходе газа $2,33 \cdot 10^{-7}$ кг/с устройство смогло выдать величину тяги в пределах 33 мкН, при удельном импульсе тяги 140 м/с. В свою очередь, энергопотребление устройства составило всего $0,81$ Вт.

Ключевые слова: микродвигатель, дилатометрический привод, холодный газ, энергоэффективность, тяга, удельный импульс тяги.

Введение

Современные достижения в области микроэлектроники широко применяются в различных отраслях хозяйственной деятельности человека. В том числе новейшие электротехнические разработки постепенно внедряются в актуальные проекты орбитальных космических аппаратов, позволяя уменьшить массу и габариты используемых спутников, не снижая качества выполняемой задачи.

Таким образом, в настоящее время сложились наиболее благоприятные условия для развития такой отрасли спутникостроения, как сверхмалые космические аппараты (СМКА). Данный класс космических аппаратов способен удовлетворить современный спрос на околоземные космические аппараты за счёт небольших габаритов и массы, низкой стоимости производства и эксплуатации, а выведение группировок СМКА количеством более 100 штук позволит снизить транспортные расходы на доставку аппаратов в открытое космическое пространство и на околоземную орбиту («Союз-2.1а» 14.07.2017 г. вывел на околоземную орбиту космический аппарат «Канопус-В-ИК» и группу из 72 малых спутников) [1].

На данном этапе развития СМКА осуществляется преимущественно неуправляемый полёт подобных аппаратов, так как развитие области двигателестроения в этом направлении отстаёт от совершенствования электротехнических систем и современного спроса на малые космические аппараты. Данная проблема связана с рядом ограничений, присущих СМКА.

Первым и основным препятствием являются энергетические ограничения систем выработки и накопления энергии СМКА. На аппаратах нанокласса (и меньше) не получается установить солнечные батареи значительной мощности, так как с уве-

личением мощности батарей будет увеличиваться их масса и габаритные размеры. Так, для КА массой около 100 кг площадь солнечных батарей составит примерно $1,5$ м², а их мощность в начальный срок активного существования составит не более 150 Вт [2].

Например, спутники конфигурации CubeSat и меньше не способны предоставить более $1-2$ Вт избыточной мощности, что не позволяет применять большинство существующих двигательных установок.

Вторым и третьим сдерживающим фактором являются требования низкого расхода рабочего вещества и невысокие показатели тяги двигателя при большом удельном импульсе тяги, т.к. высокие значения тяги негативно воздействуют на систему ориентации и стабилизации СМКА при малой массе аппарата.

Ограничение расхода и рабочих показателей можно решить использованием в качестве корректирующей ДУ ионных или электротермических (резистивных) микродвигателей. Но на данном этапе подобные конфигурации не обладают требуемой энергоэффективностью.

Другим вариантом решения проблемы является использование ДУ на «холодном газе». Подобная конфигурация двигателя способна к эксплуатации в условиях заданного ограничения энергопотребления. Однако не всегда удаётся добиться снижения расхода при заданной величине тяги.

На данный момент в мировой научно-технической сфере представлены следующие разработки в области двигателестроения для СМКА:

- 1) проект электротермического микронагнетателя Pocket-Rocket на холодном газе с удельным импульсом тяги в среднем 343 м/с при тяге $0,8$ мН [3];
- 2) двигательная установка космического корабля LISA Pathfinder способна развивать тягу

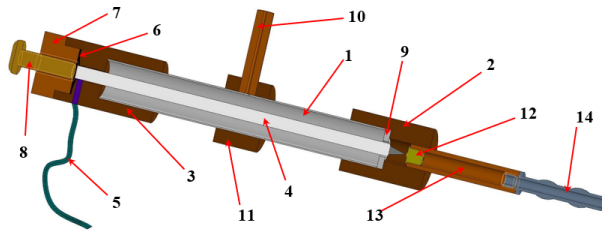


Рис. 1. Схема дилатометрического микродвигателя
Fig. 1. Scheme of a dilatometric microthruster

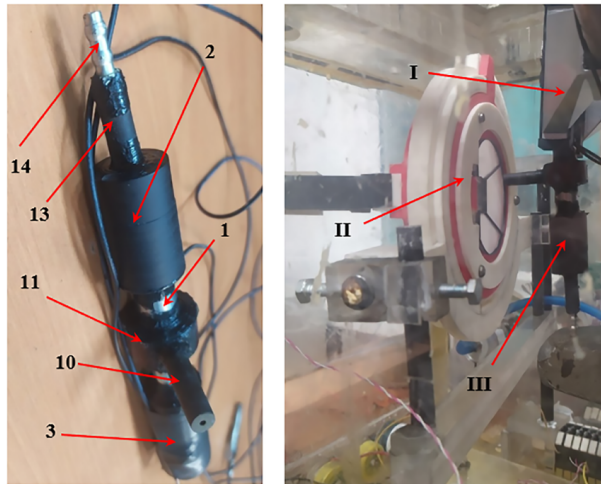


Рис. 2. Дилатометрический микродвигатель,
а — двигатель; б — двигатель на испытательной установке:
I — фиксатор двигателя;
II — стенд измерения силы давления реактивной струи;
III — дилатометрический микродвигатель
Fig. 2. Dilatometric microthruster.
а — engine; б — engine on the test facility.
I — engine lock; II — jet pressure measurement stand;
III — dilatometric microdrive

в диапазоне 1 – 500 мкН при расходе рабочего тела 0,002 – 1 мг/с [4];

3) отчёт китайских исследователей показывает, что их разработки микродвигателей способны создавать импульс величиной в 736 м/с при расходе газа 40 мг/с [5];

4) двигатель-микроклапан был установлен в качестве технологической нагрузки на МКА ST-5. Микродвигатель, по заверению производителя, обеспечивает тягу 0,05 – 2,36 Н на азоте, удельный импульс тяги — 638 м/с, энергопотребление до 2 Вт [6].

Постановка задачи

Целями исследовательской работы является разработка и создание рабочего прототипа дилатометрического микродвигателя с полимерным приводом, а также получение выходных характеристик микродвигателя.

В процессе работы над проектом были сформулированы следующие задачи:

1. Обзор известных аналогов из открытых источников.
2. Разработка концептуальной модели.
3. Создание рабочего прототипа двигателя.
4. Экспериментальные исследования прототипа двигателя в условиях вакуума.
5. Анализ экспериментальных данных.

Схема разработанного и изготовленного экспериментального образца дилатометрического микродвигателя представлена ниже на рис. 1. Для наглядности также есть фотографии двигателя на рис. 2.

Из схемы видно, что микродвигатель состоит из следующих основных частей: металлическая трубка (поз. 1); верхняя накидная крышка (поз. 2); нижняя накидная крышка (поз. 3); дилатометрический привод (поз. 4); провода электропитания привода (поз. 5); изоляционная мембрана (поз. 6); втулка под регулировочный винт (поз. 7); регулировочный винт (поз. 8); центровочное кольцо (поз. 9); сопло (поз. 10); направляющая втулка (поз. 11); обратный клапан (поз. 12); переходная втулка (поз. 13); штуцер (поз. 14).

Принцип работы дилатометрического микродвигателя основан на явлении термического расширения [7]. Рабочим элементом в нём является резистивно-полимерный (дилатометрический) привод в виде пластиковой трубки с графитовым стержнем, к которому подведены провода системы электропитания.

Процесс отработки двигателя можно разделить на три этапа:

1. Пуск — подача электропитания от источника постоянного тока на дилатометрический привод и начало процесса удлинения привода.

2. Работа — постепенное открытие обратного клапана до момента прекращения удлинения привода. Одновременно с этим происходит истечение рабочего тела во внутреннюю полость двигателя и затем в сопло, за счёт чего создаётся рабочий импульс тяги.

3. Остановка — отключение электропитания, остывание привода, из-за чего происходит закрытие обратного клапана [8].

Исследование работоспособности микродвигателя проводилось в два этапа:

1. Предварительная отработка двигателя в атмосферном пространстве.

2. Экспериментальная отработка в вакуумной камере с измерением всех требуемых показателей.

Предварительная отработка двигателя проводилась для проверки работоспособности основных подвижных элементов механизма: работа привода в паре с обратным клапаном и работа тарировочной системы — регулировочный винт.

Отработка происходила следующим образом: собранный экспериментальный образец (без штуцера и винта) закрепляли на рабочем столе, после чего в переходную втулку вводили щуп измерительного прибора, упирая его в шток обратного клапана. После установки прибора производилось ввинчивание регулировочного винта до того момента, когда стрелка на приборе начинает отклоняться и возвращаться в исходное положение при отпуске винта. В этом положении винт фиксировался, и на него наносилась риска, необходимая в случае повторной тарировки привода.

Проверка работы пары клапан-привод производилась сразу после тарировки. Испытуемый прототип подключали к источнику питания и ждали начала движения стрелки измерительного прибора. Перемещение стрелки говорило о том, что происходит открытие обратного клапана вследствие работы привода. После окончательной сборки прототипа двигателя и герметизации его элементов следовала экспериментальная отработка в вакууме.

Отработка в вакууме состояла из трёх связанных между собой экспериментов.

1. В ходе первого эксперимента требовалось определить минимальное пусковое напряжение, значение минимального рабочего напряжения, и напряжения, при котором происходит резкое открытие клапана.

2. Во втором эксперименте уточнялось значение верхней и нижней границы рабочих напряжений двигателя (напряжение начала работы и напряжение резкого роста расхода газа), путём перебора величин напряжения левее от значения предельного напряжения и правее предполагаемого минимального рабочего напряжения, полученного в первом эксперименте.

3. В третьем эксперименте полученный диапазон рабочих напряжений использовался для снятия требуемых аэродинамических параметров. За реперные точки было принято взять значения границ диапазона и точки в окрестности его центра.

Для проведения данных экспериментов использовалось оборудование, разработанное сотрудниками научно-исследовательской лаборатории «Двигательные установки микротяги малых космических аппаратов» Омского государственного технического университета, г. Омск.

Снятие показаний величин тяги производилось на стенде измерения силы давления реактивной струи, для определения расхода применялся расходомер закрытого объёма [9], а вакуумная среда создавалась с помощью вакуумной камеры аквариумного типа.

Исследование характеристик струи газа проводилось по принципу аэродинамического метода двойного угла [10].

Следовательно, математическое описание экспериментальных данных производилось с помощью следующих формул.

Сила давления (тяга) реактивной струи:

$$P = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) \cdot \frac{h}{H},$$

где m — масса поворотного экрана, g — ускорение свободного падения, h — расстояние от оси вращения экрана до его центра тяжести, H — расстояние от оси вращения экрана до его центра давления, α — угол поворота лазерного рычага, β — угол провиса мишени.

Массовый расход рабочего газа:

$$\dot{m} = \frac{m_0 - m_{\text{ост}}}{t_p},$$

где m_0 — начальная масса газа в баке расходомера; $m_{\text{ост}}$ — остаточная масса газа в баке расходомера; t_p — время работы двигателя в секундах.

Массы газа в начальный и конечный момент работы двигателя находятся из уравнения Менделеева — Клапейрона:

$$p_0 V = \frac{m_0}{M} RT \rightarrow m_0 = \frac{p_0 VM}{RT},$$

$$p_{\text{ост}} V = \frac{m_{\text{ост}}}{M} RT \rightarrow m_{\text{ост}} = \frac{p_{\text{ост}} VM}{RT},$$

где p_0 — начальное давление газа в баке расходомера; $p_{\text{ост}}$ — остаточное давление в баке расходомера; V — объём бака расходомера; M — молярная масса воздуха; R — газовая постоянная; T — температура среды.

Перевод барометрических и вакуумметрических значений давления в стандартные величины:

$$p_n = p \cdot 1000 + 101325,$$

где p_n — нормальное давление; p — значение на датчике давления.

Уравнение удельного импульса тяги и удельной тяги:

$$J_{\text{YA}} = \frac{P}{\dot{m}}, \quad P_{\text{YA}} = \frac{P}{mg},$$

где J_{YA} — массовый удельный импульс, P_{YA} — весовой удельный импульс, P — тяга двигателя в ньютонах.

Уравнение Сен-Венана для скорости истечения газа [11]:

$$w = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \left[1 - \left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]},$$

где w — скорость потока газа, $k = 1,4$ — показатель адиабаты, p_1 — давление в рабочей полости двигателя, $\rho_1 = 1,2255 \text{ кг/м}^3$ — плотность воздуха (берётся при условиях среды в расходомере), p_0 — давление в вакуумной камере.

Результаты экспериментов

Результатами первого эксперимента являются величины давления в вакуумной камере по време-

Таблица 1. Зависимость роста давления от подаваемого напряжения

Table 1. Dependence of the pressure increase on the applied voltage

№	p_0 , Па	p_{max} , Па	Δp , Па	U , В	t , с
1	11,81	12,16	0,35	2	375
2		15,63	3,82	2,5	
3		47,09	5,28	3	

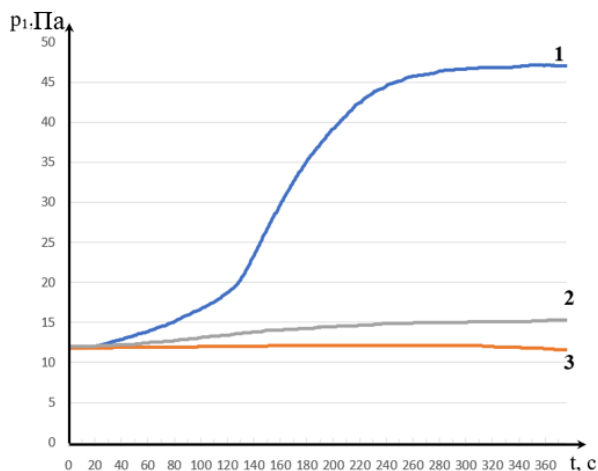


Рис. 3. График зависимости давления от времени.

Кривые изменения давления при напряжении:

1 — 3 В; 2 — 2,5 В; 3 — 2 В

Fig. 3. Graph of pressure versus time

Pressure change curves at voltage:

1 — 3 V; 2 — 2,5 V; 3 — 2 V

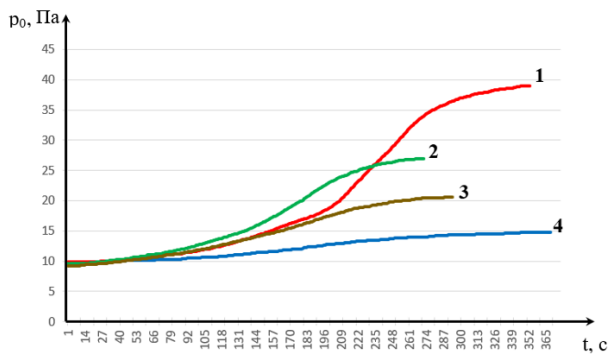


Рис. 4. Графики изменения давления в реперных точках.

Кривые изменения давления при напряжении:

1 — 2,8 В; 2 — 2,75 В; 3 — 2,73 В; 4 — 2,7 В

Fig. 4. Graphs of pressure changes at reference points

Pressure change curves under stress:

1 — 2,8 V; 2 — 2,75 V; 3 — 2,73 V; 4 — 2,7 V

ни, в зависимости от величины напряжения, установленного на источнике питания.

Из значений табл. 1 и графических данных рис. 3 видно, что минимальный стабильный рост давления наблюдается при напряжении в системе электропитания приблизительно равном 2 В. Резкий же рост давления при запуске двигателя наблюдается при напряжении 3 В. Относительно нормальный рост давления в камере наблюдается при напряжении выше 2,5 В, следовательно, диапазон рабочих напряжений лежит в промежутке от 2,5 В до 3 В. Данное множество и исследуется в дальнейшем.

Во втором эксперименте путём перебора значений напряжения были более подробно определены границы рабочих напряжений.

Наиболее стабильный и быстрый рост давления в вакуумной камере происходил при напряжении в 2,7 В, что мы видим на рис. 4. При напряжении 2,8 В и выше происходил резкий рост давления. Таким образом, рабочие напряжения лежат в диапазоне 2,7–2,8 В.

В третьем эксперименте определялись аэродинамические параметры прототипа двигателя: тяга, массовый расход на рис. 5 и удельный импульс тяги.

Также в ходе эксперимента были определены: давление в рабочей полости двигателя, время работы двигателя, рабочие мощности и напряжения. Результаты эксперимента представлены в табл. 2.

В процессе экспериментальной отработки прототипа микродвигателя для напряжений 2,73; 2,75; 2,8 не удалось корректно определить среднее значение тяги из-за недостаточной массы противовеса, так как предполагалось, что при данных режимах работы тяга, создаваемая прототипом, будет меньше ожидаемой.

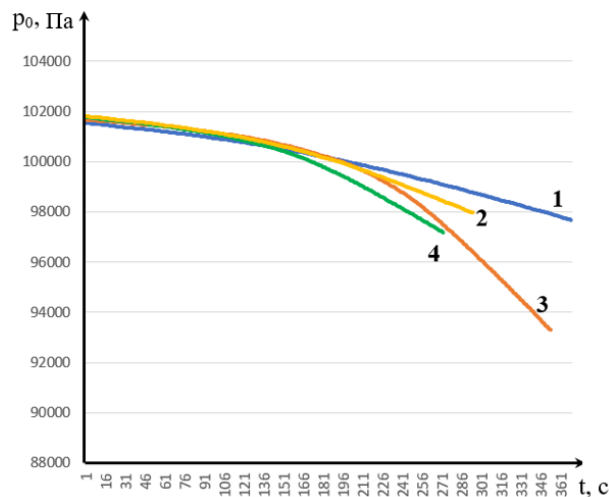


Рис. 5. График изменения давления в расходомере.

Кривые изменения давления в расходомере

при напряжении:

1 — 2,8 В; 2 — 2,75 В; 3 — 2,73 В; 4 — 2,7 В

Fig. 5. Flow meter pressure change graph

Curves of pressure changes in the flow meter at voltage:

1 — 2,8 V; 2 — 2,75 V; 3 — 2,73 V; 4 — 2,7 V

Анализ результатов эксперимента

В процессе исследовательской деятельности был разработан и сконструирован рабочий прототип микродвигателя на холодном газе с полимерным дилатометрическим клапаном.

Результаты экспериментальной отработки прототипа двигателя говорят о том, что устройство способно работать при значениях потребляемой мощности 0,81–0,87 Вт, при этом расходуя на самом экономичном режиме не более 0,3 мг/с рабочего газа.

Также, исходя из анализа экспериментальных данных, можно сказать, что пуск и работа прототипа осуществляется плавно по нисходящей кривой на всём промежутке времени вплоть до выхода на «плато» (полное открытие клапана). Это означает, что подобный двигатель, предположительно, можно использовать как источник постоянного импульса движения.

В дальнейшем планируется дорабатывать конструкцию двигателя: заменить прямоточное сопло на сопло переменного сечения, изменить конструкцию отсечного клапана и механизма тарировки положения привода.

Выводы

Создан рабочий прототип микродвигателя на холодном газе, пусковым элементом в котором являет-

Таблица 2. Аэродинамические параметры прототипа двигателя
Table 2. Aerodynamic parameters of the prototype engine

U , В	N , Вт	P , Н·10 ⁻⁶	$\dot{m}$, (кг/с)·10 ⁻⁷	J_{yA} , м/с	P_{yA} , с	p_0 , Па	p_1 , Па
2,7	0,81	32,59	2,33	139,79	14,25	14,81	4267,3
2,73	0,82	—	2,91	—	—	20,55	—
2,75	0,83	—	3,77	—	—	26,96	—
2,8	0,87	—	5,28	—	—	39,03	—

ся полимерный дилатометрический привод. Устройство показало свою работоспособность, а именно:

- 1) энергоэффективность и низкий расход газа в сравнении с аналогами;
- 2) плавный пуск и работу на протяжении всего времени проведения эмпирических исследований;
- 3) невысокие тяговые характеристики, что требует доработки.

Вероятнее всего, невысокие аэродинамические характеристики газовой струи связаны с тем, что при испытании прототипа использовалось прямоточное сопло с равным входным и выходным диаметром. Также могло оказать влияние то, что исследование проводилось с использованием в качестве рабочего газа воздушной смеси, подававшейся под давлением 101325 Па.

Список источников

1. Ракета «Союз-2.1а» вывела на орбиту рекордное для России количество спутников. URL: <https://tass.ru/kosmos/4413644> (дата обращения: 20.08.2023).
2. Полищук Г. М., Пичхадзе К. М. Автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований. Москва: МАИПринт, 2010. 660 с. ISBN 978-5-7035-2176-2.
3. Ho T. S., Charles Ch., Boswell R. W. A Comprehensive Cold Gas Performance Study of the Pocket Rocket Radiofrequency Electrothermal Microthruster // *Frontiers in Physics*. 2017. Vol. 4. P. 1 – 16. DOI: 10.3389/fphy.2016.00055.
4. Spaceflight. Micro Propulsion System. URL: <https://spaceflight101.com/lisa-pathfinder/cold-gas-micro-propulsion-system/> (дата обращения: 20.08.2023).
5. Li M.-X., Tang Hai-Bin, Zhang Z. Experimental investigation on dynamic and steady performance of cold gas micro-propulsion thruster // *Journal of Propulsion Technology*. 2013. Vol. 36. P. 728 – 733.
6. Levchenko I., Bazaka K., Ding Y. [et al.]. Space micropropulsion systems for Cubesats and small satellites: From proximate targets to furthestmost frontiers // *Applied Physics Reviews*. 2018. Vol. 5. P. 011104. DOI: 10.1063/1.5007734.
7. Литая А. Н., Вавилов И. С., Жвайдес Е. И. [и др.]. Исследование реактивной струи дилатометрического резистивного микродвигателя малого космического аппарата аэродинамическим методом // Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической техники и подготовки инженерных кадров для авиакосмической отрасли: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф., посвященной памяти главного конструктора ПО «Полёт» А. С. Клинышкова. Омск, 02–03 апреля 2019. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. С. 11–20. EDN: XPOUBM.
8. Смагин М. В., Колягин Е. Е., Суднев В. В. [и др.]. Исследование режимов работы полимерного дилатометрического привода // Проблемы машиноведения: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф., Омск, 22–23 марта 2022. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2022. С. 78–84. DOI: 10.25206/978-5-8149-3453-6-2022-78-84. EDN: ANXPJC.

9. Ющенко В. А., Ячменев П. С. Определение массового расхода газа низкого давления, поступающего к рабочему объекту, находящемуся в условиях вакуума // Молодой исследователь: вызовы и перспективы: сб. ст. по материалам СХС VI Международ. науч.-практ. конф., Москва, 11 января 2021. Москва: ООО Интернаука, 2021. Т. 1. С. 548 – 555. EDN: WYUOAT.

10. Вавилов И. С., Ячменев П. С., Федянин В. В., Жариков К. И., Степень П. В., Лукьянчик А. И., Кузьменко И. А. Двухазорный СВЧ ионный двигателя и его исследование аэродинамическим методом // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 1. С. 109 – 117. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-1-109-117. EDN: JTZQOD.

11. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. В 2 ч. 5-е изд., перераб. и доп. Москва: Наука. 1991. Ч. 1. 597с. ISBN 5-02-014015-5.

СМАГИН Михаил Валерьевич, студент гр. ПРД-201 факультета транспорта, нефти и газа Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 5665-5519

AuthorID (РИНЦ): 1142573

ORCID: 0000-0002-6878-1742

ResearcherID: JFK-6943-2023

Адрес для переписки: smagin-2003@mail.ru

КОЛЯГИН Егор Евгеньевич, студент гр. ПРД-201 факультета транспорта, нефти и газа ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1024-5146

AuthorID (РИНЦ): 1214255

ORCID: 0009-0001-7059-9165

ResearcherID: JFL-1427-2023

Адрес для переписки: kolyagin.y@bk.ru

ВАВИЛОВ Игорь Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3468-6744

AuthorID (РИНЦ): 518332

AuthorID (SCOPUS): 56610211900

ResearcherID: B-2634-2014

Адрес для переписки: vava-igg@mail.ru

Для цитирования

Смагин М. В., Колягин Е. Е., Вавилов И. С. Анализ работоспособности дилатометрического микродвигателя с полимерными рабочими компонентами // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 4. С. 72–78. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-72-78.

Статья поступила в редакцию 05.10.2023 г.

© М. В. Смагин, Е. Е. Колягин, И. С. Вавилов

THE ANALYSIS OF OPERABILITY OF DILATOMETRIC MICROTHRUSTER WITH POLYMER WORKING COMPONENTS

M. V. Smagin, E. E. Kolyagin, I. S. Vavilov

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The article describes the device of a dilatometric microthruster. The study of the device's operability with low power consumption is carried out. It is based on the designed prototype of the thruster in vacuum conditions. The results of the experiments showed that at the pressure of the working gas-air mixture at the thruster inlet of 1 atm. and with a mass flow rate of gas $2,33 \cdot 10^{-7}$ kg/s, the device is able to produce a thrust value within 33 mkH, with a specific thrust pulse of 140 m/s. In turn, the power consumption of the device is only 0,81 W.

Keywords: microthruster, dilatometric microthruster, cold gas, energy efficiency, thrust, specific thrust impulse.

References

1. Raketa «Soyuz-2.1a» vyvela na orbitu rekordnoye dlya Rossii kolichestvo sputnikov [Russian state federal news agency TASS. The «Soyuz-2.1a» rocket launched a record number of satellites into orbit for Russia]. URL: <https://tass.ru/kosmos/4413644> (accessed: 20.08.2023). (In Russ.).
2. Polishchuk G. M., Pichkhadze K. M. Avtomaticheskiye kosmicheskiye apparaty dlya fundamental'nykh i prikladnykh nauchnykh issledovaniy [Automatic spacecraft for fundamental and applied scientific research]. Moscow, 2010. 660 p. ISBN 978-5-7035-2176-2. (In Russ.).
3. Ho T. S., Charles Ch., Boswell R. W. A Comprehensive Cold Gas Performance Study of the Pocket Rocket Radiofrequency Electrothermal Microthruster // *Frontiers in Physics*. 2017. Vol. 4. P. 1 – 16. DOI: 10.3389/fphy.2016.00055. (In Engl.).
4. Spaceflight. Micro Propulsion System. URL: <https://spaceflight101.com/lisa-pathfinder/cold-gas-micro-propulsion-system/> (accessed: 20.08.2023). (In Engl.).
5. Li M.-X., Tang Hai-Bin, Zhang Z. Experimental investigation on dynamic and steady performance of cold gas micro-propulsion thruster // *Journal of Propulsion Technology*. 2013. Vol. 36. P. 728 – 733. (In Engl.).
6. Levchenko I., Bazaka K., Ding Y. [et al.]. Space micropropulsion systems for Cubesats and small satellites: From proximate targets to furthestmost frontiers // *Applied Physics Reviews*. 2018. Vol. 5. P. 011104. DOI: 10.1063/1.5007734. (In Engl.).
7. Litau L. N., Vavilov I. S., Zhvaydes E. I. [et al.]. Issledovaniye reaktivnoy strui dilatometricheskogo rezistivnogo mikrodvigatelya malogo kosmicheskogo apparata aerodinamicheskim metodom [Investigation of the jet stream of a dilatometric resistive microthruster of a small spacecraft by an aerodynamic method] // *Problemy Razrabotki, Izgotovleniya i Ekspluatatsii Raketno-Kosmicheskoy Tekhniki i Podgotovki Inzhenernykh Kadrov Dlya Aviakosmicheskoy Otrastli. Problems of Development, Manufacture and Operation of Rocket and Space Technology and Training of Engineers for the Aerospace Industry*. Omsk, 2019. P. 11 – 20. EDN: XPOUBM. (In Russ.).
8. Smagin M. V., Kolyagin E. E., Sudnev V. V. [et al.]. Issledovaniye rezhimov raboty polimernogo dilatometricheskogo privoda [Investigation of the modes of operation of a polymer

dilatometric thruster] // *Problemy Mashinovedeniya. Problems of Mechanical Engineering*. Omsk, 2022. P. 78 – 84. DOI: 10.25206/978-5-8149-3453-6-2022-78-84. EDN: ANXPJC. (In Russ.).

9. Yushchenko V. A., Yachmenev P. S. Opreddeniye massovogo rashkoda gaza nizkogo davleniya, postupayushchego k rabochemu ob'yektu, nakhodyashchemusya v usloviyakh vakuuma [Determination of the mass flow rate of low-pressure gas flowing to a working object in vacuum conditions] // *Molodoy Issledovatel': Vyzovy i Perspektivy. Young Researcher: Challenges and Prospects*. Moscow, 2021. Vol. 1. P. 548 – 555. EDN: WIYOAT. (In Russ.).

10. Vavilov I. S., Yachmenev P. S., Fedyanin V. V., Zharikov K. I., Stepen P. V., Lukyanchik A. I., Kuzmenko I. A. Dvukhzazornyy SVCH ionnyy dvigatelya i ego issledovaniye aerodinamicheskim metodom [Two-gaps microwave ion engine and its study by aerodynamic method] // *Omskiy Nauchnyy Vestnik. Ser. Aviatsonno-Raketnoye i Energeticheskoye Mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2022. Vol. 6, no. 1. P. 109 – 117. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-1-109-117. EDN: JTZQOD. (In Russ.).

11. Abramovich G. N. Prikladnaya gazovaya dinamika. V 2 ch. [Applied gas dynamics. In 2 Parts]. 5th ed. Moscow, 1991. Part 1. 597 p. ISBN 5-02-014015-5. (In Russ.).

SMAGIN Mikhail Valeryevich, Student, gr. PRD-201 of Transport, Oil and Gas Faculty, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.
SPIN-code: 5665-5519
AuthorID (RSCI): 1142573
ORCID: 0000-0002-6878-1742
ResearcherID: JFK-6943-2023
Correspondence address: smagin-2003@mail.ru
KOLYAGIN Egor Evgenyevich, Student, gr. PRD-201 of Transport, Oil and Gas Faculty, OmSTU, Omsk.
SPIN-code: 1024-5146
AuthorID (RSCI): 1214255
ORCID: 0009-0001-7059-9165



ResearcherID: JFL-1427-2023

Correspondence address: kolyagin.y@bk.ru

VAVILOV Igor Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Aircraft and Rocket Building Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 3468-6744

AuthorID (RSCI): 518332

AuthorID (SCOPUS): 56610211900

ResearcherID: B-2634-2014

Correspondence address: vava-igg@mail.ru

For citations

Smagin M. V., Kolyagin E. E., Vavilov I. S. The analysis of operability of dilatometric microthruster with polymer working components // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2023. Vol. 7, no. 4. P. 72–78. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-72-78.

Received October 5, 2023.

© **M. V. Smagin, E. E. Kolyagin, I. S. Vavilov**

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ С НАЛОЖЕННОЙ НИЗКОЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ, ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА

Д. А. Негров, В. Ю. Путинцев, А. И. Глотов, Д. А. Вебер

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Одной из задач полимерного материаловедения является изучение возможностей повышения комплекса упруго-прочностных характеристик и трибологических свойств полимерных композиционных материалов путем усовершенствования технологии изготовления. В данной работе рассмотрено воздействие ультразвуковых колебаний частотой 17 кГц с одновременно наложенной низкочастотной модуляцией частотой 100 Гц в процессе синтеза, на свойства и структуру многокомпонентного полимерного композиционного материала торговой марки КВН-3.

В результате проведенных исследований установлено, что влияние технологического режима прессования, заключающегося в совмещенном воздействии колебаний частотой 17 кГц и 100 Гц в процессе синтеза КВН-3, позволяет повысить комплекс упруго-механических характеристик: предел прочности при растяжении на 3 %, относительное удлинение на 6 %, модуль упругости на 10 %, твердость на 2 % по сравнению с промышленным способом изготовления, а также снизить интенсивность массового изнашивания на 68 % и коэффициент трения на 3 %.

Была рассмотрена структура полимерных композиционных материалов после разных технологических режимов прессования. Фибриллярная структура полимерной матрицы после технологического режима с воздействием ультразвуковых колебаний и низкочастотной модуляции становится более мелкой и равномерно распределенной.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, ультразвуковое воздействие, низкочастотная модуляция, полимерные композиционные материалы, износостойкость.

Введение

Долговечность работы металлополимерных узлов трения во многом определяется износостойкостью применяемого композита. Для изготовления элементов пар трения, используемых в криогенной технике (поршневые кольца безмасляных компрессоров), применяются полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе политетрафторэтилена торговой марки КВН-3, обладающего стабильно низким коэффициентом трения при эксплуатации со скоростью скольжения до 6 м/с и свойством самосмазывания в период эксплуатации [1]. Однако входящие в состав композита металлические наполнители из-за низкой адгезионной способности склонны к вырыванию из полимерной матрицы в процессе эксплуатации, что приводит к изменению геометрии контактной поверхности пары трения и увеличению её износа [2–3]. Проводимые исследования в области поиска новых технологий изготовления полимерных материалов для повышения износостойкости являются актуальными с точки зрения повышения надежности эксплуатации оборудования [4–8].

Одним из методов повышения износостойкости композитов является воздействие энергии ультразвуковых колебаний в процессе холодного прессования изделия, в результате чего наблюдается ряд физических и химических явлений, приводящих

к изменению адгезионных свойств, способствующих повышению износостойкости готовых изделий [9–10]. Целью данной работы является исследование влияния ультразвукового воздействия с одновременно наложенной низкочастотной модуляцией на комплекс упруго-прочностных и трибологических свойств, а также структуру материала КВН-3.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является промышленно выпускаемый многокомпонентный композиционный материал марки КВН-3, в состав которого входит: фторопласт-4 — 77 масс. %, порошок бронзы — 8 масс. %, порошок свинца — 7 масс. %, дисульфид молибдена — 3 масс. %, кокс — 5 масс. %.

Предварительно, перед прессованием образцов ПКМ, проводилось удаление влаги из смеси композиционного материала в лабораторном вакуумном сушильном шкафу в течение четырех часов и последующее перемешивание с измельчением высушенной смеси в бисерной лабораторной мельнице, после чего проводилось просеивание смеси через мелкозернистое сито и равномерное заполнение всего объема пресс-формы.

В данной работе методика исследования заключалась в сравнении влияния технологий изготовления материала КВН-3 на упруго-прочностные характеристики и трибологические свойства.

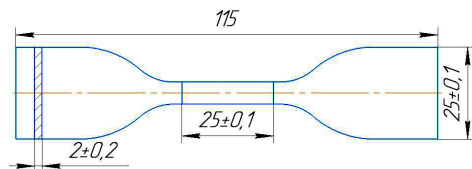


Рис. 1. Образец «Тип 1»
для определения механических свойств
Fig. 1. Sample «Type 1» for determining
mechanical properties

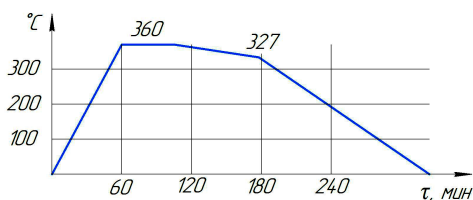


Рис. 2. Схема-график ступенчатой
термической обработки
Fig. 2. Diagram of stepwise heat treatment

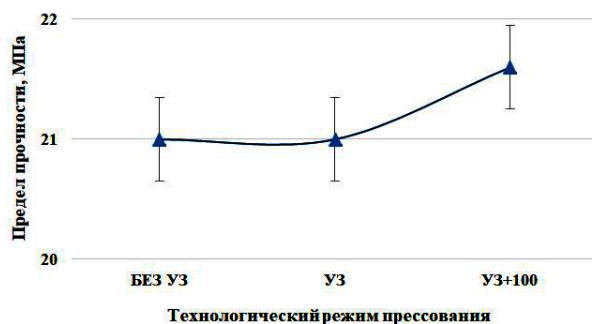


Рис. 3. Зависимость предела прочности
от технологического режима прессования
Fig. 3. Dependence of the ultimate strength on the
technological pressing mode

Первая технология изготовления полностью повторяла промышленную технологию изготовления композиционного материала КВН-3 — холодное прессование композиционной смеси без наложения ультразвуковых колебаний (без УЗ). Вторая технология — прессование с наложением ультразвуковых колебаний частотой 17 кГц. Третья технология — прессование с наложением ультразвуковых колебаний частотой 17 кГц и низкочастотной модуляцией 100 Гц (УЗ + 100). Для всех исследуемых режимов изготовления давление прессования 80 МПа, время прессования 60 секунд. Прессование образцов проводилось при комнатной температуре, в помещении с относительной влажностью 40–50 %.

Образцы материала изготавливали на установке, состоящей из гидравлического пресса, ультразвукового генератора, магнитострикционного преобразователя, матрицы и ультразвукового пуансона. Образцы для исследования механических свойств были изготовлены в виде лопатки «Тип 1» в соответствии с ГОСТ 11262-2017 (рис. 1). Для определения трибологических свойств образцы были изготовлены в виде цилиндров диаметром $10,0 \pm 0,1$ мм, длиной $15 \pm 0,1$ мм.

Заключительным этапом изготовления образцов являлось ступенчатое спекание образцов в лабора-

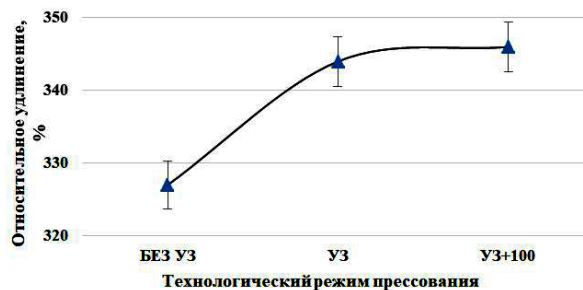


Рис. 4. Зависимость относительного удлинения
от технологического режима прессования
Fig. 4. Dependence of relative elongation on the technological
pressing mode

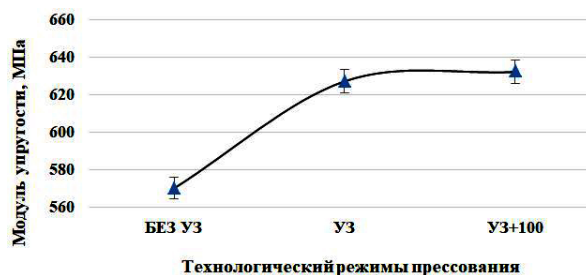


Рис. 5. Зависимость модуля упругости
от технологического режима прессования
Fig. 5. Dependence of the modulus of elasticity on the
technological pressing mode

торной печи. Технологический режим спекания заключался в плавном нагреве до 360 ± 1 °C со скоростью 2 °C/мин, последующей выдержке при температуре 360 ± 1 °C, исходя из расчета 9 мин на 1 мм толщины образца, регулируемом охлаждении со скоростью 0,5 °C/мин до 327 °C и дальнейшим охлаждением вместе с печью до комнатной температуры (рис. 2).

Для определения предела прочности и относительного удлинения проводилось согласно ГОСТ 11262-80, а также модуля упругости в соответствии с методикой ГОСТ 25.601-80. Определение твердости проводилось по Шору (шкала D) согласно ГОСТ 24621-2015. Трибологические свойства материалов определялись на машине трения УМТ-2168.

Для проведения исследований надмолекулярной структуры поверхностного слоя образцов ПКМ был использован растровый электронный микроскоп JSM-5700 фирмы JEOL (Япония).

Результаты исследования

В результате сравнения влияния технологий прессования на предел прочности установлено, что использование технологии ультразвукового прессования (УЗ) по сравнению с промышленной технологией (БЕЗ УЗ) практически не приводит к изменению прочности материала. Применение режима с низкочастотной модуляцией (УЗ + 100) позволяет лишь незначительно увеличить предел прочности на 3 % (рис. 3).

Ультразвуковое воздействие на прессуемый композиционный материал повышает относительное удлинение. Наибольшие показатели достигаются при изготовлении по режиму (УЗ + 100) и со-

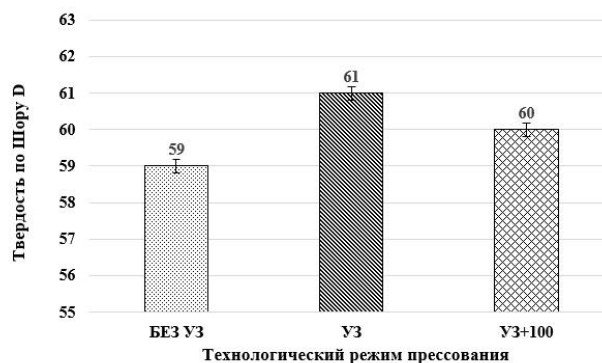


Рис. 6. Зависимость твердости от технологического режима прессования
Fig. 6. Dependence of hardness on the technological pressing mode

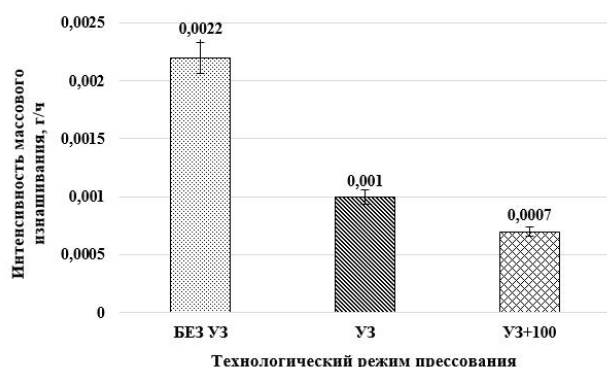


Рис. 7. Зависимость интенсивности массового изнашивания от технологического режима прессования
Fig. 7. Dependence of the intensity of mass wear on the technological pressing mode

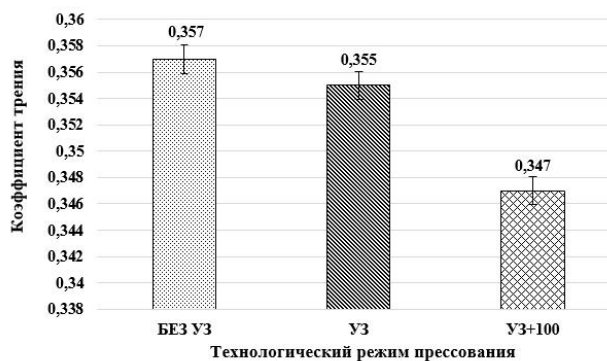


Рис. 8. Зависимость коэффициента трения от технологического режима прессования
Fig. 8. Dependence of the friction coefficient on the technological pressing mode

ставляют 347 %, что на 6 % выше, чем у образцов промышленной технологии прессования (рис. 4).

Применение технологического режима (УЗ + 100) также позволяет увеличить модуль упругости (рис. 5) до 631 МПа, что на 10 % больше, по сравнению с изготовлением промышленной технологии прессования. Твердость по Шору D образцов КВН-3 находится в диапазоне 59–61 единица (рис. 6).

В результате исследования трибологических свойств материала КВН-3 установлено, что приме-

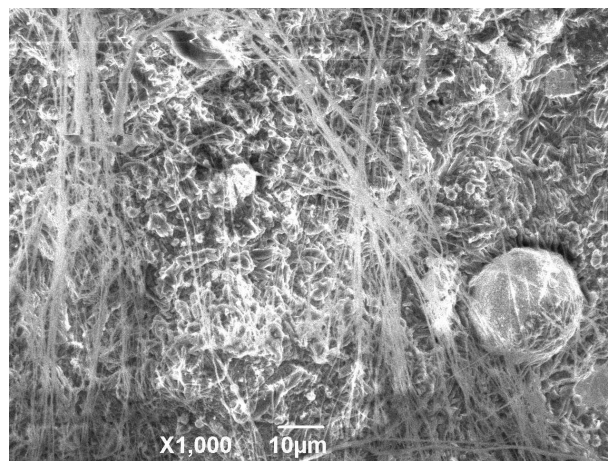


Рис. 9. Микрофотография скола образца КВН-3, полученного по промышленной технологии прессования (БЕЗ УЗ)

Fig. 9. Micrograph of the cleavage of the KVN-3 sample obtained using industrial pressing technology (without ultrasound)

нение технологии синтеза (УЗ + 100) позволяет существенно снизить интенсивность массового изнашивания на 68 % (рис. 7) и снизить коэффициент трения на 3 % (рис. 8).

Предположительно, значительное повышение износостойкости КВН-3, при его изготовлении с применением ультразвуковых колебаний с наложенной низкочастотной модуляцией, может быть связано с более равномерным распределением по всему объему и увеличением адгезии частиц наполнителей в полимерной матрице.

Формирование надмолекулярной структуры связано с процессами трансформации и распределения частиц модификаторов в полимерной матрице при прессовании и требует подробного изучения при помощи электронной микроскопии. Для предотвращения разрушения поверхности образцов под воздействием электронного пучка исследования проводили при величине энергии электронов 5 кэВ, что не способствовало ухудшению изображений.

Микрофотографии структуры изготовленных образцов ПКМ характеризуются присутствием структурных элементов разнообразных геометрических форм и размеров из-за многокомпонентного наполнения композита. У образцов, полученных согласно промышленной технологии изготовления (рис. 9), обнаружена общая неоднородность структуры в объеме полимерной матрицы, что может свидетельствовать о неравномерном распределении частиц наполнителей и о процессе скопления наполнителей в менее упорядоченных областях материала [11]. Структура образцов, изготовленных по технологическому режиму (УЗ), отличается отсутствием областей скопления модификаторов, фибриллы полимерной основы незначительно увеличены (рис. 10).

Микроструктура образца КВН-3, полученного по технологическому режиму изготовления УЗ + 100 (рис. 11), заметно отличается от образца, изготовленного в соответствии с промышленной технологией. Наблюдается увеличение количества равномерно распределенных твердых частиц наполнителя округлой формы, локализованных в приповерхностном слое ПКМ, что в дальнейшем способствует защите от разрушения при фрикционном контакте материалов. Фибриллярная структура политетрафторэтиленовой матрицы становится более мелкой

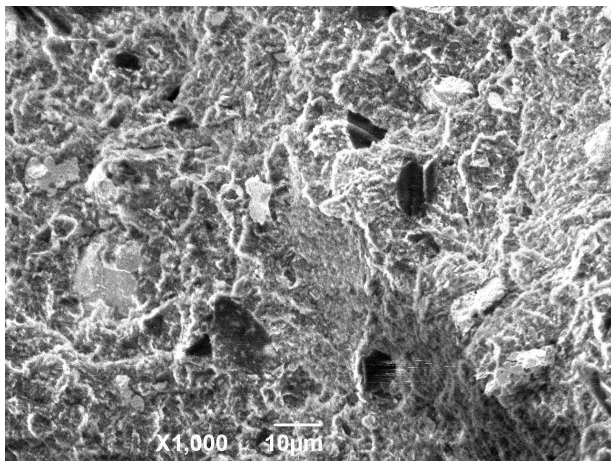


Рис. 10. Микрофотография скола образца КВН-3, полученного по ультразвуковой технологии прессования (УЗ)

Fig. 10. Microphotograph of a chip of the KVN-3 sample obtained using ultrasound pressing technology (ultrasound)

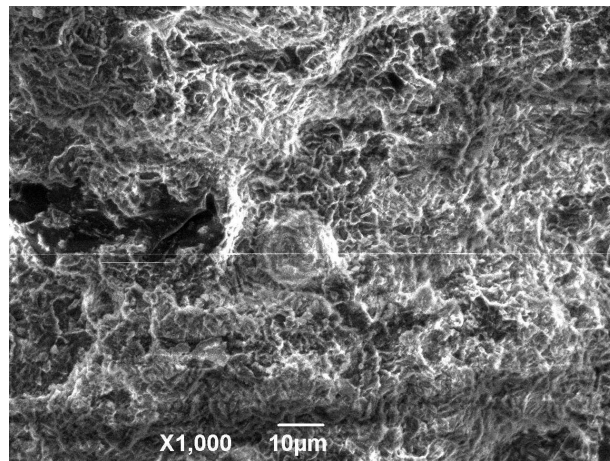


Рис. 11. Микрофотография скола образца КВН-3, полученного по ультразвуковой технологии прессования с наложением низкочастотной модуляции (УЗ+100)

Fig. 11. Microphotograph of a chip of a KVN-3 sample obtained using ultrasound pressing technology with the application of low-frequency modulation (ultrasound+100)

и однородной в сравнении с микрофотографиями сколов, полученных после других технологических режимов прессования.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено влияние технологий прессования полимерного композиционного материала КВН-3 на его комплекс упруго-прочностных характеристик и трибологических свойств.

Режим УЗ+100 позволяет повысить механические свойства ПКМ: предел прочности при растяжении на 3 %, относительное удлинение на 6 %, модуль упругости на 10 %, твердость на 2 %.

На основании проведенных исследований триботехнических характеристик КВН-3 наблюдается значительное снижение интенсивности массового изнашивания на 68 % и снижение коэффициента трения на 3 %.

Микрофотографии структуры образцов КВН-3 свидетельствуют, что при ультразвуковой технологии прессования с наложением низкочастотной модуляции частицы модификаторов композиционного материала упорядоченно распределены по объему материала, структура однородная, микрофибриллы политетрафторэтилена более мелкие в сравнении с другими технологическими режимами прессования.

Список источников

1. КВН-3 (Композиционные антифрикционные материалы для узлов трения и механизмов): справочник. URL: <https://cryontk.ru/services/spetsialnye-tehnologii/> (дата обращения: 10.09.2023).
2. Колесников И. В. Межатомные взаимодействия на поверхностях металлополимерного трибосопряжения // Мир транспорта. 2015. Т. 13, № 1 (56). С. 16–27.
3. Рогов В. Е., Цыренова Г. Д., Черский И. Н. Трибосинтез фторида свинца при трении фторопластовых свинецсодержащих композиций и его влияние на их износостойкость // Трение и износ. 2009. Т. 30, № 4. С. 390–395.
4. Машков Ю. К., Кропотин О. В., Чемисенко О. В. Разработка и исследование полимерного нанокомпозита для ме-

таллополимерных узлов трения // Омский научный вестник. 2014. № 3 (133). С. 64–66. EDN: TKDJUD.

5. Кокосова А. С., Сокольская М. К., Виткалова И. А. [и др.]. Наполнители для модификации современных полимерных композиционных материалов // Фундаментальные исследования. 2017. № 10-3. С. 459–465.

6. Негров Д. А., Путинцев В. Ю. Усовершенствование технологии прессования изделий из политетрафторэтилена // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2021. № 14 (5). С. 564–571. DOI: 10.17516/1999-494X-0333.

7. Григорьева Т. Ф., Ковалева С. А., Жорник В. И. [и др.]. Механохимический синтез полимерсодержащих композитов на основе нитрида бора // Химия в интересах устойчивого развития. 2019. Т. 27, № 3. С. 293–297. DOI: 10.15372/KhUR2019136.

8. Стручкова Т. С., Нюрова А. Г., Николаева А. Д. Исследование влияния терморасширенного графита на триботехнические характеристики политетрафторэтилена // Южно-Сибирский научный вестник. 2019. № 4-1 (28), С. 303–306.

9. Негров Д. А., Еремин Е. Н., Путинцев В. Ю., Мулюкова А. Р. Изменение механических свойств полимерного материала при воздействии ультразвуковых колебаний // Ученые Омска — региону: материалы I Регион. науч.-техн. конф., 28–29 декабря 2016 года. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. С. 81–84.

10. Негров Д. А., Путинцев В. Ю. Влияние низкочастотной модуляции на механические свойства и триботехнические характеристики полимерных композиционных материалов // Ползуновский вестник. 2021. № 4. С. 140–145. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.018.

11. Соломко В. П. О явлении межструктурного наполнения и его влияния на свойства полимера // Механика полимеров. 1976. № 1. С. 162–166.

НЕГРОВ Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение», секция «Материаловедение и технология конструкционных материалов» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 4888-7947

AuthorID (РИНЦ): 684462

AuthorID (SCOPUS): 54959361600

Адрес для переписки: negrov_d_a@mail.ru

ПУТИНЦЕВ Виталий Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение», секция «Материаловедение и технология конструкционных материалов» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 7304-5954

AuthorID (РИНЦ): 827297

AuthorID (SCOPUS): 57203584921

Адрес для переписки: putintsev_vit@mail.ru

ГЛОТОВ Алексей Игоревич, магистрант, гр. МТМ-221 Машиностроительного института, ассистент кафедры «Машиностроение и материаловедение», секция «Материаловедение и технология конструкционных материалов» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 5491-2176

AuthorID (РИНЦ): 1189428,

Адрес для переписки: aiglотов@omgtu.ru

ВЕБЕР Денис Александрович, студент, гр. МТМ-201 Машиностроительного института, лаборант кафе-

дры «Машиностроение и материаловедение», секция «Материаловедение и технология конструкционных материалов» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 9455-4101

AuthorID (РИНЦ): 1123215

Адрес для переписки: den.veber.18@bk.ru

Для цитирования

Негров Д. А., Путинцев В. Ю., Глотов А. И., Вебер Д. А. Влияние ультразвуковых колебаний с наложенной низкочастотной модуляцией на механические, трибологические свойства и структуру многокомпонентного полимерного композита // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 4. С. 79–84. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-79-84.

Статья поступила в редакцию 17.08.2023 г.

© Д. А. Негров, В. Ю. Путинцев, А. И. Глотов, Д. А. Вебер

UDC 534-16:531.44

DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-79-84

EDN: NVXVTO

THE EFFECT OF ULTRASONIC VIBRATIONS WITH SUPERIMPOSED LOW-FREQUENCY MODULATION ON THE MECHANICAL, TRIBOLOGICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF A MULTICOMPONENT POLYMER COMPOSITE

D. A. Negrov, V. Yu. Putintsev, A. I. Glotov, D. A. Veber

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

One of the tasks of polymer materials science is to study the possibilities of improving the complex of elastic-strength characteristics and tribological properties of polymer composite materials by improving the manufacturing technology. In this paper, the influence of ultrasonic vibrations with a frequency of 17 kHz with a low-frequency vibration with a frequency of 100 Hz during synthesis on the properties and structure of a multicomponent polymer composite material of the KVN-3 trademark is considered. The result of the research, it is found that the influence of the technological mode of pressing, consisting in the combined effect of ultrasonic vibrations with frequency and low-frequency vibration during the synthesis of KVN-3, makes it possible to increase the complex of elastic-mechanical characteristics: tensile strength by 3 %, elongation by 6 %, modulus of elasticity by 10 %, hardness by 2 %, compared to the industrial manufacturing method, as well as to reduce the intensity of mass wear by 68 % and the coefficient of friction by 3 %.

The structure of polymer composite materials after different technological pressing modes is examined. The fibrillar structure of the polymer matrix after the technological regime with the influence of ultrasonic vibrations and low-frequency modulation becomes finer and more uniform.

Keywords: polytetrafluoroethylene, ultrasonic exposure, low-frequency modulation, polymer composite materials, wear resistance.

References

1. KVN-3 (Kompozitsionnyye antifriktsionnyye materialy dlya uzlov treniya i mekhanizmov): spravochnik [KVN-3 (Composite antifriction materials for friction units and mechanisms): handbook]. URL: <https://cryontk.ru/services/spetsialnyye-tehnologii/> (accessed: 10.09.2023). (In Russ.).

2. Kolesnikov I. V. Mezhatomnyye vzaimodeystviya na poverkhnostyakh metallopolimernogo tribosopryazheniya [Interatomic interactions on the surfaces of metal polymer tribocoupling] // Mir transporta. *World of Transport and Transportation*. 2015. Vol. 13, no. 1 (56). P. 16–27. (In Russ.).

3. Rogov V. E., Tsyrenova G. D., Cherskiy I. N. Tribosintez florida svintsa pri trenii fluoroplastovykh svinetssoderzhashchikh



kompozitsiy i ego vliyaniye na ikh iznosostoykost' [Tribosynthesis of lead fluoride in friction of fluoroelastic lead-containing composites and its effect on wear resistance] // *Treniye i iznos. Friction and Wear*. 2009. Vol. 30, no. 4. P. 390–395. (In Russ.).

4. Mashkov Yu. K., Kropotin O. V., Chemisenko O. V. Razrabotka i issledovaniye polimernogo nanokompozita dlya metallopolymernykh uzlov treniya [Development and study of polymer nanocomposite for metalpolymer friction units] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2014. No. 3 (133). P. 64–66. (In Russ.).

5. Kokosova A. S., Sokol'skaya M. K., Vitkalova I. A. [et al.]. Napolniteli dlya modifikatsii sovremennykh polimernykh kompozitsionnykh materialov [Fillers to modify the modern polymer composite materials] // *Fundamental'nyye issledovaniya. Fundamental Research*. 2017. No. 10-3. P. 459–465. (In Russ.).

6. Negrov D. A., Putintsev V. Yu. Usovershenstvovaniye tekhnologii pressovaniya izdeliy iz politetraftoretilena [Improvement of Pressing Technology of Products from Polytetrafluoroethylene] // *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2021. No. 14 (5). P. 564–571. DOI: 10.17516/1999-494X-0333. (In Russ.).

7. Grigoryeva T. F., Kovaleva S. A., Zhornik V. I. [et al.]. Mekhanokhimicheskiy sintez polimersoderzhashchikh kompozitov na osnove nitrída bora [Mechanochemical synthesis of polymer-containing composites based on boron nitride] // *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya. Chemistry for Sustainable Development*. 2019. Vol. 27, no. 3. P. 293–297. DOI: 10.15372/KhUR2019136. (In Russ.).

8. Struchkova T. S., Nyurova A. G., Nikolayeva A. D. Issledovaniye vliyaniya termorasshirennoy grafita na tribotekhnicheskiye kharakteristiki politetraftoretilena [Investigation of the influence of thermally expanded graphite on tribotechnical characteristics of polytetrafluoroethylene] // *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik. South-Siberian Scientific Bulletin*. 2019. No. 4-1 (28). P. 303–306. (In Russ.).

9. Negrov D. A., Eremin E. N., Putintsev V. Yu., Mulyukova A. R. Izmeneniye mekhanicheskikh svoystv polimernogo materila pri vozdeystvii ul'trazvukovykh kolebaniy [Change of mechanical properties of polymer material under the influence of ultrasonic vibrations] // *Uchenyye Omska – regionu. Scientists of Omsk – to the Region*. Omsk, 2016. P. 81–84. (In Russ.).

10. Negrov D. A., Putintsev V. Yu. Vliyaniye nizkochastotnoy modulyatsii na mekhanicheskiye svoystva i tribotekhnicheskiye kharakteristiki polimernykh kompozitsionnykh materialov [Influence of low-frequency modulation on mechanical properties and tribotechnical characteristics of polymer composite materials] // *Polzunovskiy vestnik. Polzunovskiy Vestnik*. 2021. No. 4. P. 140–145. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.018. (In Russ.).

11. Solomko V. P. O yavlenii mezhstrukturnogo napolneniya i ego vliyaniya na svoystva polimera [On the phenomenon of interstructural filling and its influence on polymer properties] //

Mekhanika polimerov. Mechanics of Polymers. 1976. No. 1. P. 162–166. (In Russ.).

NEGROV Dmitriy Anatolyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Mechanical Engineering and Materials Science Department, Materials Science and Technology of Structural Materials Section, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 4888-7947

AuthorID (RSCI): 684462

AuthorID (SCOPUS): 54959361600

Correspondence address: negrov_d_a@mail.ru

PUTINTSEV Vitaliy Yuryevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Mechanical Engineering and Materials Science Department, Materials Science and Technology of Structural Materials Section, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 7304-5954

AuthorID (RSCI): 827297

AuthorID (SCOPUS): 57203584921

Correspondence address: putintsev_vit@mail.ru

GLOTOV Aleksey Igorevich, Undergraduate, gr. MTMm-221 of Mechanical Engineering Institute, Assistant of Mechanical Engineering and Materials Science Department, Materials Science and Technology of Structural Materials Section, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 5491-2176

AuthorID (RSCI): 1189428,

Correspondence address: aiglотов@omgtu.ru

VEBER Denis Aleksandrovich, Student, gr. MTM-201 of Mechanical Engineering Institute, Laboratory Assistant of Mechanical Engineering and Materials Science Department, Materials Science and Technology of Structural Materials Section, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 9455-4101

AuthorID (RSCI): 1123215

Correspondence address: den.veber.18@bk.ru

For citations

Negrov D. A., Putintsev V. Yu., Glotov A. I., Veber D. A. The effect of ultrasonic vibrations with superimposed low-frequency modulation on the mechanical, tribological properties and structure of a multicomponent polymer composite // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2023. Vol. 7, no. 4. P. 79–84. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-79-84.

Received August 17, 2023.

© D. A. Negrov, V. Yu. Putintsev, A. I. Glotov, D. A. Veber

ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК
Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение

включен в **Перечень** рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Адрес издателя и редакции: 644050, Омская обл., г. Омск, пр. Мира, 11,
Омский государственный технический университет, корпус 6, каб. 424;
тел. (3812) 65-32-08; e-mail: onv@omgtu.ru

Адрес типографии: 644050, Омская обл., г. Омск, пр. Мира, 11,
Омский государственный технический университет, корпус 6, каб. 333,
тел. (3812) 65-32-08.
Цена свободная