



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

Том 20 № 4 (2019)

DOI: 10.22363/2312-8143-2019-20-4

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

Научный журнал

Издается с 2000 г.

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

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

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

Главный редактор

Разумный Юрий Николаевич – доктор технических наук, профессор, директор Инженерной академии, директор департамента механики и мехатроники Инженерной академии, Российский университет дружбы народов

Заместитель главного редактора

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

Ответственный секретарь

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

Члены редакционной коллегии

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

Галишикова Вера Владимировна – доктор технических наук, директор департамента строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов

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

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

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

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

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

Мальшиев Вениамин Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой системного анализа, Московский авиационный институт

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

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

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

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

Агравал Бридж – профессор Навал Постградуейт Скул, Монтерей, США

Варатараджу Ренугант – профессор Университета Путра Малайзия, Малайзия

Герман Анна – профессор Университета Бейра Интериор, Португалия

Грациани Филиппо – профессор Римского университета «Ла Сапиенца», Италия

Мисра Арун – профессор Университета МакГилл, Канада

Мортари Даниэль – профессор Техасского университета А&М, США

Спенсер Дэвид – профессор Университета Пенн Стейт, США

Фурфаро Роберто – профессор Университета Аризоны, США

Хоуэлл Кэтлин – профессор, Университет Пердью, Уэст-Лафайетт, США

Ясака Тетсуо – почетный профессор, Университет Кюсю, Япония

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

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

Периодичность 4 выпуска в год.

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

Языки: русский, английский.

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

Подписной индекс по каталогу агентства «Роспечать» – 18230.

Цель и тематика

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

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

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

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

Адрес редакционной коллегии журнала «Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования»:
Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: +7 (495) 955-07-92; e-mail: engj@rudn.ru

Подписано в печать 23.12.2019. Выход в свет 30.12.2019. Формат 60×84/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Times New Roman».
Усл. печ. л. 6,51. Тираж 500 экз. Заказ № 1845. Цена свободная.

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

Отпечатано в типографии ИПК РУДН
Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: +7 (495) 952-04-41; e-mail: publishing@rudn.ru



RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCHES

Volume 20 Number 4 (2019)

DOI: 10.22363/2312-8143-2019-20-4

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

Founded in 2000

Founder: Peoples' Friendship University of Russia

Editor-in-Chief

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

Associate Editor-in-Chief

Sergey V. Reznik – Professor, Head of the Department “Rocket and Space Composite Structures”, Bauman Moscow State Technical University

Assistant to the Editor-in-Chief

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

Editorial Board

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

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

Askhat I. Diveev – Professor, Head of the Sector of Problems of Cybernetics of Federal Research Center “Informatics and Control”, Russian Academy of Sciences

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

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

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

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

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

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

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

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

Valeriy M. Fomin – Professor, Moscow Polytechnic University

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

Renuganth Varatharajoo – Professor, University Putra Malaysia, Malaysia

Anna Guerman – Professor, Universidade da Beira Interior, Portugal

Filippo Graziani – Professor, University Roma “La Sapienza”, Italy

Arun Misra – Professor, McGill University, Canada

Daniele Mortari – Professor, Texas A&M University, USA

David Spencer – Professor, Penn State University, USA

Roberto Furfaro – Associate Professor, Professor, University of Arizona, USA

Kathleen Howell – Professor of the Purdue University, West Lafayette, USA

Tetsuo Yasaka – Professor Emeritus, Kyushu University, Japan

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

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

Published 4 times a year.

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

Languages: Russian, English.

Indexed by DOAJ, RSCI (elibrary.ru), Ulrich's Periodicals Directory, Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, East View, Dimensions, EBSCOhost.

Aims and Scope

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

The scientific journal "RUDN Journal of Engineering Researches" is addressed to researchers, engineers, graduate students, senior students of polytechnical universities. The journal has been included in the list of the leading review journals and editions of the Highest Certification Committee of Ministry of Education and Science of Russian Federation in which the basic results of PhD and Doctoral Theses are to be published. The journal website operates on the Portal of RUDN University scientific journals: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches>. The website contains full information about the journal, editorial policy and ethics, requirements for the preparation and publication of the articles, etc., as well as full-text issues of the journal since 2008 (Open Access).

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

Address of the editorial board:

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

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

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

Printing run 500 copies. Open price.

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

Printed at RUDN Publishing House:

3 Ordzhonikidze St., Moscow, 115419, Russian Federation
Ph.: +7 (495) 952-04-41; e-mail: publishing@rudn.ru

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИОННАЯ И КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

- Разумный Ю.Н., Купреев С.А.** О движении тел на основе изменения кинетического момента ... 267
- Филина Е.К., Михайловский К.В., Архипов М.Ю., Голубев Е.С.** Разработка схемы подкрепления отражающей обшивки рефлектора методами параметрической и топологической оптимизации 276

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Смирнов С.В., Копылов В.В., Макаров А.Р., Воробьев А.А., Шкарин К.В.** Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния юбки поршня двигателя внутреннего сгорания на безмоторном стенде 285
- Кожанов Р.В., Кожанова Е.Р., Сорокина Л.А.** Сравнительный анализ программного обеспечения для изучения статистических методов контроля качества продукции 293

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Melendez Giraldo D.S.** Diagnosis, recommendations and optimization for potable water treatment plant in Cauca (Colombia) (Диагностика, рекомендации и оптимизация станции очистки питьевой воды в Кауке (Колумбия)) 302
- Корнилова А.В., Чжо Заяр.** Определение допустимых параметров дефектов в базовых деталях кузнечно-прессовых машин 308

CONTENTS

AEROSPACE ENGINEERING

- Razoumny Y.N., Kupreev S.A.** On the motion of bodies based on changes in the kinetic moment 267
- Filina E.K., Mikhailovskiy K.V., Arkhipov M.Y., Golubev E.S.** Design of the structural arrangement for a space reflector via parametric and topology optimization 276

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

- Smirnov S.V., Kopylov V.V., Makarov A.R., Vorobyev A.A., Shkarin K.V.** An experimental study of the stress-strain state of the engine piston skirt on the engineless stand 285
- Kozhanov R.V., Kozhanova E.R., Sorokina L.A.** Comparative analysis of software for the study of statistical methods of control of product quality 293

EARTH SCIENCE

- Melendez Giraldo D.S.** Diagnosis, recommendations and optimization for potable water treatment plant in Cauca (Colombia) 302
- Kornilova A.V., Kyaw Zaya.** Definition of acceptable parameters of defects in basic details of forging and press machines 308

АВИАЦИОННАЯ И КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА
AEROSPACE ENGINEERING

DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-4-267-275

УДК 629.76

Научная статья

О движении тел на основе изменения кинетического момента

Ю.Н. Разумный, С.А. Купреев

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

История статьи:

Поступила в редакцию: 01 ноября 2019

Доработана: 15 ноября 2019

Принята к публикации: 22 ноября 2019

Ключевые слова:

движение без расхода массы, гравитационное поле, гравитация, движение без перегрузки

Рассматривается управляемое движение тела в центральном гравитационном поле без расхода массы. Показана возможность перемещения тела в радиальном направлении от центра притяжения за счет изменения кинетического момента относительно центра масс тела. Предложена схема перемещения тела с использованием системы маховиков, расположенных в одной плоскости на околокруговых орбитах с разными высотами. В качестве маховиков рассматривается использование спина элементарных частиц. Доказано, что использование спина элементарных частиц с комптоновской длиной волны, превышающей расстояние до притягивающего центра, энергетически более выгодно, чем использование импульса этих частиц для перемещения тела. Приведен расчет движения с использованием гипотетических частиц (гравитонов). Выдвинута гипотеза об излучении тел при ускоренном движении, которая находит косвенные подтверждения в звездной динамике и эксперименте с падением двух тел в вакууме. Полученные результаты могут быть использованы в экспериментах для поиска элементарных частиц с низкой энергией, объяснения космических феноменов и разработки транспортных объектов на новых физических принципах.

Введение

Идеи управляемого движения тела в центральном гравитационном поле без расхода массы выдвигались специалистами в области динамики орбитальных тросовых систем [1–10]. В.В. Бе-

лецкий в работах [1; 2] предложил способ и модель космического аппарата в виде гантели, способного совершать космические перелеты между компланарными орбитами без расходования рабочего тела. Крупногабаритная гантель располагается в пространстве по бинормали к орбите так, что центр масс ее движется по орбите, в плоскости которой находится притягивающий центр, а концевые массы находятся по разную сторону от этой плоскости. Показано, что, изменяя длину штанги гантели, можно увеличить эксцентриситет орбиты.

А.В. Пироженко в работах [3; 4] приводит схемы управления элементами орбиты за счет различной ориентации гантели с изменяемой дли-

Разумный Юрий Николаевич, директор департамента механики и мехатроники Инженерной академии РУДН, директор Инженерной академии РУДН, доктор технических наук, профессор, академик Российской академии космонавтики имени К.Э. Циолковского, академик Международной академии астронавтики; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1337-5672>, eLIBRARY SPIN-код: 7704-4720.

Купреев Сергей Алексеевич, профессор департамента механики и мехатроники Инженерной академии РУДН, заместитель директора по научной работе Инженерной академии РУДН, доктор технических наук, доцент; kupreev-sa@rudn.ru; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8657-2282>, eLIBRARY SPIN-код: 2287-2902.

© Разумный Ю.Н., Купреев С.А., 2019

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

ной штанги, в том числе рассматривается применение маховиков для удержания гантели в заданном положении. Предложена идея использования вращающейся орбитальной тросовой системы с изменяемой длиной связи, которая заключается в том, что за счет внутренних сил изменяется расстояние между концевыми телами и тем самым регулируется угловая скорость вращения системы таким образом, чтобы в нужной ориентации система находилась дольше, чем в положении, дающем обратный эффект управления. Эта идея также рассматривается В.И. Щербаковым [5].

В работе [6] управление элементами орбит реализуется тросовой системой с периодически изменяемой длиной за счет учета неоднородности поля тяготения.

А.С. Поповым в работе [7] рассматривается модельная задача изменения параметров орбиты космического аппарата, представляющего собой систему из двух масс, расталкиваемых и сближаемых периодически формируемой связью в плоскости орбиты.

В монографиях [8–10] приводятся схемы управляемого движения космического аппарата за счет применения орбитальных тросовых систем с разрывом связи.

Целью данной работы является доказательство возможности и энергетической целесообразности реализации принципа движения, основанного на изменении кинетического момента. Доказательство основано на двух фактах. Во-первых, обсуждается связь между вращательным движением и радиальным движением в центральном поле тяготения. Затем рассматривается применение спина элементарных частиц и анализируются затраты энергии на движение тела. Представленный пример с низкоэнергетическими элементарными частицами приводит к гипотезе излучения телами при ускоренном движении. Косвенными подтверждениями выдвинутой гипотезы служат феномены из звездной динамики и эксперимент с падением двух тел в вакууме.

1. Взаимосвязь вращательного и радиального движения

В центральном поле силы тяготения существует взаимосвязь вращательного движения относительно центра масс и радиального движения центра.

Рассмотрим движение твердой гантели в центральном гравитационном поле. Будем полагать,

что две концевые точные массы гантели соединены невесомым жестким стержнем. На гантель действуют две внешние силы притяжения \mathbf{G}_1 и \mathbf{G}_2 (рис. 1).

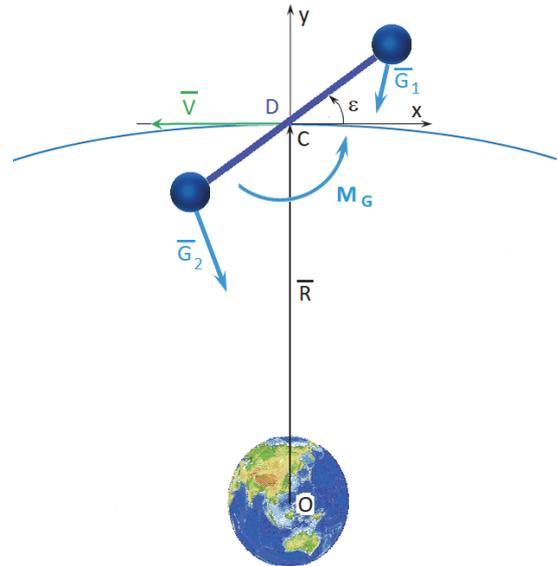


Рис. 1. Движение гантели в центральном гравитационном поле
[Figure 1. The movement of the dumbbell in the central gravitational field]

Изменение кинетического момента гантели \mathbf{K} относительно центра O равно главному моменту внешних сил \mathbf{M}_e (теорема об изменении кинетического момента):

$$\frac{d\mathbf{K}}{dt} = \mathbf{M}_e. \quad (1)$$

Моменты сил притяжения \mathbf{G}_1 и \mathbf{G}_2 относительно центра O равны нулю, следовательно

$$\mathbf{M}_e = 0, \quad (2)$$

а кинетический момент гантели \mathbf{K} – величина постоянная.

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_e + \mathbf{K}_i, \quad (3)$$

где \mathbf{K}_e – вектор кинетического момента центра масс гантели C , в котором сосредоточена вся масса гантели, относительно центра O ; \mathbf{K}_i – вектор кинетического момента вращения гантели относительно центра масс C .

$$\mathbf{K}_e = m \mathbf{R} \times \mathbf{V}, \quad (4)$$

где m – масса гантели; \mathbf{R} – радиус-вектор центра масс гантели до притягивающего центра O ; \mathbf{V} – вектор скорости центра масс C гантели.

$$K_i = J_D \Omega, \tag{5}$$

где J_D – момент инерции гантели в плоскости движения относительно центра C , центральный осевой (бинормальный) момент инерции; Ω – абсолютная угловая скорость вращения гантели.

При отклонении гантели от местной вертикали, относительно центра C возникает момент сил G_1 и G_2 , стремящийся вернуть гантель в положение вдоль местной вертикали:

$$M_G = 3\mu_0 \frac{J_D}{R^3} \sin 2\varepsilon, \tag{6}$$

где ε – угол между осью S_x орбитальной системы координат S_{xyz} и линией, соединяющей концевые элементы гантели; $\mu_0 = 3,986 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$ – геоцентрическая гравитационная постоянная Земли.

Максимальное значение M_G при $\varepsilon = \pi/4$. Для сохранения заданного положения гантели под углом ε требуется уравнивающий момент M_J ($M_G = M_J$), который можно создать с использованием маховика.

$$M_J = J\dot{\omega}; \tag{7}$$

где J – момент инерции маховика; $\dot{\omega}$ – угловое ускорение вращения маховика.

В итоге, раскручивая маховик до некоторой угловой скорости ω , можно изменить кинетический момент K_i , а следовательно, и кинетический момент K_e центра масс гантели C . Ограничение на максимальное изменение K_e обусловлено предельной угловой скоростью вращения маховика.

На рис. 2 представлена схема радиального перемещения центра масс гантели C . Путем изменения направления вращения маховиков движение системы возможно осуществлять вверх (рис. 2, а) и вниз (рис. 2, б). Предел перемещения ограничен максимальной угловой скоростью вращения маховика. Имея группировку маховиков с разными высотами орбит в одной плоскости, возможно реализовать схему передвижения встречных грузопотоков без расхода топлива. Для раскрутки маховиков достаточно электроэнергии от источников питания (например, солнечных батарей). Однако техническая реализация и эффективность орбитальных маневров данной схемы [3; 4] уступает маневрам по обмену кинетической энергией с применением технологий тросовых систем [9–13].

Факт взаимосвязи вращательного движения вокруг центра масс и радиального движения наблюдается в природе. Ежегодно Луна удаляется от Земли на 3,8 см, при этом Земля замедляет свою угловую скорость вращения [14].

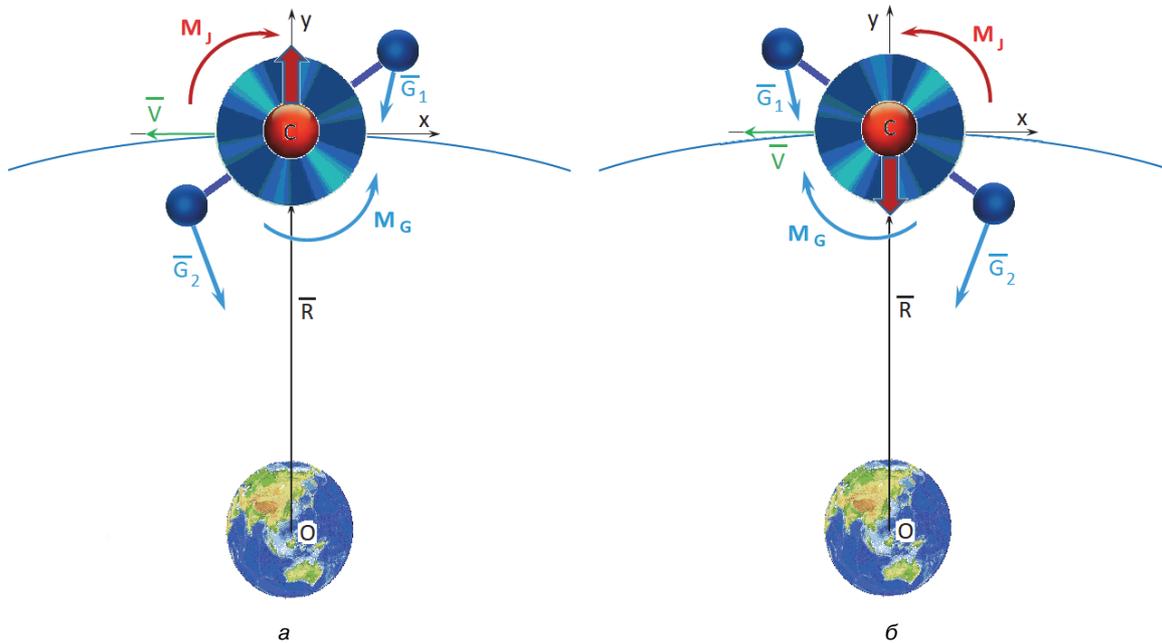


Рис. 2. Схема перемещения в радиальном направлении
 [Figure 2. The pattern of movement in the radial direction]

2. Применение спина элементарных частиц

Элементарные частицы обладают спином (собственным моментом импульса), который имеет квантовую природу и не связан с перемещением частицы как целого.

Используем в качестве маховиков элементарные частицы (рис. 3).

$$m \mathbf{R} \times \Delta \mathbf{V}_K = n s \frac{h}{2\pi}, \quad (8)$$

где $\Delta \mathbf{V}_K$ – вектор изменения скорости объекта массой m в случае изменения его кинетического момента \mathbf{K} за счет излучения n элементарных частиц; s – вектор спина элементарной частицы; h – постоянная Планка ($h = 6,626070040 \cdot 10^{-34}$ Дж · с).

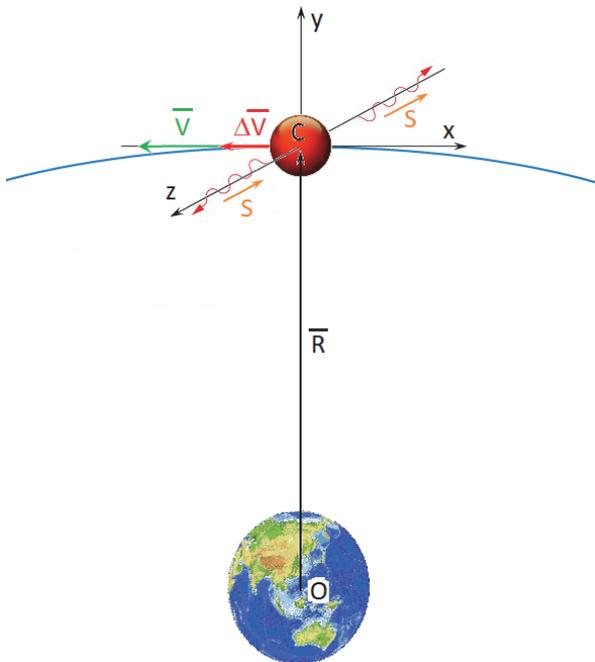


Рис. 3. Движение на основе использования спина элементарных частиц
[Figure 3. Movement based on the use of the spin of elementary particles]

Полагая изменение направления скорости $\Delta \mathbf{V}_K \perp \mathbf{R}$, в скалярном виде

$$m R \Delta V_K = n \frac{s h}{2\pi} \quad (9)$$

или

$$m \Delta V_K = n \frac{s h}{2\pi R}. \quad (10)$$

Проанализируем последнее выражение с точки зрения энергетических затрат при движении на

основе применения изменения кинетического момента и импульса (реактивного движения). Для оценки энергетических затрат на основе применения реактивного движения рассмотрим фотонный двигатель, который может развить максимально возможную для реактивного двигателя тягу в пересчете на затраченную массу перемещаемого объекта.

$$m \Delta V_J = n \frac{h}{\lambda}, \quad (11)$$

где ΔV_J – вектор изменения скорости объекта массой m в случае реактивного движения за счет излучения n фотонов с длиной волны λ . В этом случае затраты энергии для движения

$$\Delta E_J = n \frac{h c}{\lambda}, \quad (12)$$

где c – скорость света.

Импульс тех же n фотонов с использованием их спина для движения объекта определяется выражением (10), а энергетические затраты на перемещение объекта массой m :

$$\Delta E_K = n \frac{s h c}{2\pi R}. \quad (13)$$

Из выражений (12) и (13) можно сделать вывод, что при $\lambda > 2\pi R/s$ для изменения скорости объекта в центральном поле на расстоянии R от центра притяжения энергетически более выгодно использовать кинетический момент элементарной частицы по сравнению с ее импульсом (реактивное движение). При этом излучение низкоэнергетических частиц следует проводить в направлении, перпендикулярном плоскости движения (рис. 3). Полученные результаты возможно использовать в экспериментах для поиска низкоэнергетических элементарных частиц и для разработки транспортных объектов на новых физических принципах.

3. Случай применения гравитонов

Комптоновская длина волны гравитона $\lambda_g > 1 \cdot 10^{16}$ м [15], что гораздо больше радиуса Земли (6 371 000 м) и расстояния от Земли до Солнца (149 600 000 000 м). Таким образом, если для движения применять гравитоны, то использование их спина (кинетического момента) в 10^9 раз выгоднее использования их в реактивном движении у поверхности Земли. Вектор спина s (направление излучения) направлен перпендикулярно плоскости движения объекта.

Оценим ускорение, которое получает объект:

$$a = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{s h}{2\pi R m \Delta t} \quad (14)$$

Доказана возможность контроля квантовых процессов с точностью до трех аттосекунд ($\Delta t = 3 \cdot 10^{-18}$ с) [16]. Спин гравитона $s = 2$. Масса нейтрона (протона) $1,675 \cdot 10^{-27}$ кг ($m = 1,675 \cdot 10^{-27}$ кг), $R = 6,371 \cdot 10^6$ м. Тогда на каждый нейтрон (протон) будет действовать ускорение $a = 6\,600$ м/с².

Для движения макрообъектов с такими ускорениями без внутренней деформации необходимо, чтобы все атомы объекта одновременно испускали низкоэнергетические частицы. Таким образом, мы получаем движение без перегрузки.

4. Дискуссия

Пример с гравитонами и схема перемещения объекта в радиальном направлении (рис. 2) дают основание для выдвижения гипотезы о наличии излучения/поглощения элементарных частиц, обладающих спином. Движение в радиальном направлении гантели с маховиком относительно центра притяжения (рис. 2, а) можно трактовать следующим образом:

$$K_{e1} = K_{e0} + K_r, \quad (15)$$

где K_{e0} , K_{e1} – начальный (в момент времени t_0) и конечный (в момент времени t_1) векторы кинетического момента центра масс гантели C ; K_r – вектор кинетического момента излучения (или поглощения) элементарных частиц за время $\Delta t = t_1 - t_0$ по причине ускоренного вращения маховика.

Выражение (15) для кинетического момента тела позволяет более глубоко объяснить феномен радиального перемещения центра масс C в центральном гравитационном поле. При этом также происходит изменение внутреннего кинетического момента системы:

$$K_{i1} = K_{i0} - K_r. \quad (16)$$

Данная гипотеза не противоречит закону сохранения кинетического момента (3):

$$K = K_{i1} + K_{e1} = K_{i0} - K_r + K_{e0} + K_r. \quad (17)$$

На закон сохранения кинетического момента следует смотреть шире. В случае неупругого столкновения объектов их кинетический момент переходит в кинетический момент и спин элементарных частиц, то есть не компенсируется, как в настоящее время принято в механике.

$$K_1 - K_0 \pm K_r = 0. \quad (18)$$

Таким образом, ускоренное движение тел сопровождается излучением (поглощением) с кинетическим моментом K_r .

Косвенным подтверждением выдвинутой гипотезы могут служить явления, наблюдаемые в звездной динамике. Полярное струйное течение (джет), когда по причине динамического взаимодействия внутри аккреционного диска космического объекта из него вдоль его оси вращения выбрасываются потоки вещества (рис. 4), имеет схожую картину с предполагаемым излучением вследствие изменения кинетического момента (рис. 3).



Рис. 4. Выброс потоков вещества вдоль оси вращения космического объекта
[Figure 4. The flow ejection of matter along the axis of a space object rotation]

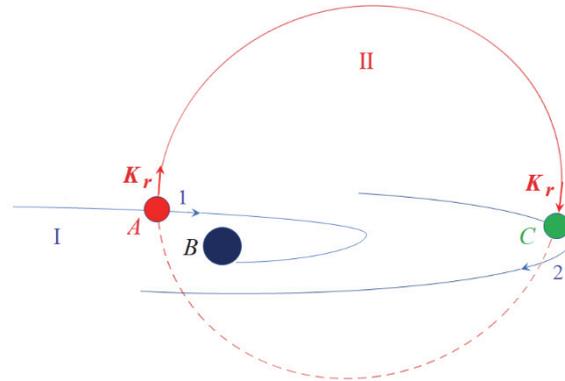


Рис. 5. Схема излучения элементарных частиц со спином у центра галактики и их поглощение на окраине галактики
[Figure 5. The radiation pattern of elementary particles with a spin in central galaxies and their absorption in the outskirts of the galaxy]

Проблема несоответствия между наблюдаемыми скоростями вращения материи в дисковых частях спиральных галактик и предсказаниями

кеплеровской динамики, учитывающими только видимую массу. В настоящий момент считается, что это несоответствие выдает присутствие темной материи, которая пронизывает галактику и простирается до галактического гало. Звезды вращаются вокруг центра галактики с постоянной скоростью в большом диапазоне расстояний от цен-

тра галактики. Таким образом, звезды вращаются гораздо быстрее, чем ожидалось, если бы они находились в свободном потенциале Ньютона. В случае наличия излучения элементарных частиц телами, движущимися с ускорениями у центра галактики, имеет место поглощение этого излучения на окраинах галактики.

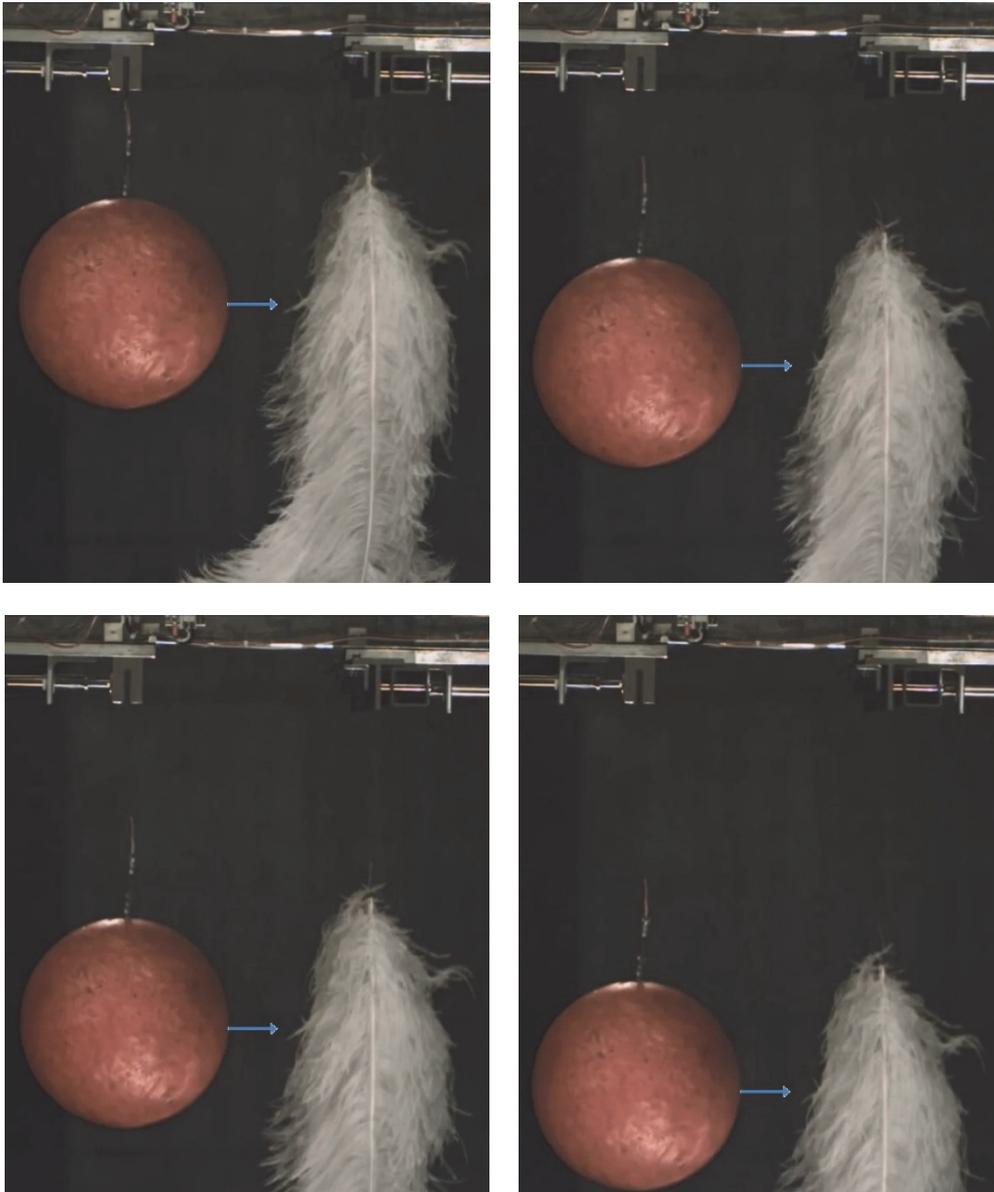


Рис. 6. Кадры падения свинцового шара и пера в вакууме
[Figure 6. Drop frames of a lead ball and pen in a vacuum]

На рис. 5 представлена схема такого процесса: тело *A* движется у центра галактики *B* в направлении *1*. Тело *C* находится на окраине галактики и движется в направлении *2*. Движение этих трех тел происходит в плоскости галактики *I*. Теряя

кинетический момент, тело *A* излучает в направлении, перпендикулярном плоскости движения *I*, поток элементарных частиц с кинетическим моментом K_r . Этот поток частиц движется по эллиптической орбите вокруг центра галактики *B* из пери-

центра A в апоцентр C в плоскости II . Тело C поглощает излучение с кинетическим моментом K_r и получает дополнительную скорость в направлении движения 2. Двигаясь в направлении 1 тело A излучает поток элементарных частиц, который движется по эллиптическим орбитам. Попадая в этот поток, тела галактики совершают движение отличное от кеплеровского.

Пример с гравитонами также приводит к дискуссии о причинах квантовой неопределенности и спиновой релаксации наблюдаемых частиц: происходит постоянное их взаимодействие со спином низкоэнергетических частиц, излучаемых/поглощаемых телами при ускоренном движении.

Наличие излучения/поглощения низкоэнергетических частиц со спином (рис. 3) может быть применено для обоснования тяги EmDrive [17; 18]. В случае должного подтверждения выдвинутой гипотезы целесообразно построение строгой теории, основанной на постулате полного сохранения кинетического момента.

5. Эксперимент с падением двух тел в вакууме

Известно, что любые два предмета в вакууме будут падать с одинаковой скоростью. Популярный эксперимент с гравитацией провел физик Брайан Кокс в большой вакуумной камере Space Power Facility НАСА в американском штате Огайо [19]. Рассмотрим одновременное падение свинцового шара и пера в вакууме, представленное на четырех кадрах (рис. 6). Обращает на себя внимание факт движения ворсинок пера напротив центра шара.

После одновременного освобождения от крепления шара и пера в первые мгновения падения на видеосъемке эксперимента [19] наблюдается движение ворсинок пера, обусловленное их упругими свойствами при переходе от подвешенного состояния пера к невесомости (свободному падению). В последующие мгновения движение ворсинок пера, обращенных к центру шара, отличается от общего движения остальных ворсинок, что может быть вызвано наличием излучения низкоэнергетических частиц при ускоренном движении шара в плоскости перпендикулярной его движению.

Заключение

При $\lambda > 2\pi R/s$ для изменения скорости объекта в центральном поле на расстоянии R от центра

притяжения энергетически более выгодно использовать кинетический момент элементарной частицы по сравнению с ее импульсом (реактивное движение).

Полученные результаты могут быть использованы в экспериментах для поиска низкоэнергетических элементарных частиц и для разработки транспортных объектов на новых физических принципах.

Требуются разработка теории (или обзор с доработкой существующих) на постулате полного сохранения кинетического момента и экспериментальная ее апробация.

Список литературы

1. Белецкий В.В., Левин Е.М. Динамика космических тросовых систем. М.: Наука, 1990. 336 с.
2. Белецкий В.В. Очерки о движении космических тел. 3-е изд. М.: Изд-во ЛКИ, 2009. 432 с.
3. Алтатов А.П. и др. Динамика космических систем с тросовыми и шарнирными соединениями. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2007. 559 с.
4. Пироженко А.В. Управляемое движение связки двух тел в ньютоновском поле сил изменением длины связи // Космические исследования. 1990. Т. 30. № 4. С. 473–482.
5. Щербаков В.И. Орбитальные маневры космической тросовой системы. СПб.: Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2010. 185 с.
6. Breakwell J.V., Gearhart J.W. Pumping a Tethered Configuration to Boost its Orbit Around an Oblate Planet // NASA, AIAA, and PSN, International Conference on Tethers in Space, Arlington, VA, Sept. 17–19, 1986. 23 p.
7. Попов А.С. Анализ возможности использования расталкиваемой двухмассовой космической системы с периодически формируемой связью для межорбитальных перелетов // Вестник МАИ. 2017. Т. 24. № 3. С. 72–77.
8. Aslanov V.S., Ledkov A.S., Dynamics of the Tethered Satellite Systems. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012. 331 p.
9. Иванов В.А., Купреев С.А., Ручинский В.С. Космические тросовые системы: учебное пособие. М.: Альфа-М, 2014. 208 с.
10. Иванов В.А., Купреев С.А., Либерзон М.Р. Сближение в космосе с использованием тросовых систем: монография. М.: Хоружевский, 2010. 360 с.
11. Isaacs J.D., Vine A.C., Bradner H., Bachus G.E. Satellite elongation into a true “sky-hook” // Science. 1966. Vol. 151. No. 3711. Pp. 682–683. doi:10.1126/science.151.3711.682.
12. Ариутанов Ю.Н. В космос без ракет: новая идея космического старта // Знание – сила. 1969. № 7. С. 25.

13. Pearson J. The Orbital Tower: A Spacecraft Launcher Using the Earth's Rotational Energy // *Acta Astronautica*. 1975. No. 2 (9–10). Pp. 785–799.

14. Murray C.D., Dermott S.F. *Solar System Dynamics*. Cambridge University Press, 1999. P. 184.

15. Abbott B.P. et al. GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2 // *Physical Review Letters*. 2017, 1 June. Vol. 118. 221101 / LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration. doi:10.1103/PhysRevLett.118.221101.

16. Prince K.C. et al. Coherent control with a short-wavelength free-electron laser // *Nature Photonics*. 2016. Vol. 10. Pp. 176–179.

17. Sawyer R.A. Theory of Microwave Propulsion for Spacecraft. Theory paper v. 9.3 // *New Scientist*. 2006. URL: <http://www.emdrive.com/>

18. NASA Team Claims 'Impossible' Space Engine Works – Get the Facts // *National Geographic*. 2016, 21 November. URL: <https://news.nationalgeographic.com/2016/11/nasa-impossible-emdrive-physics-peer-review-space-science/> (дата обращения: 21.10.2019).

19. Watch a Feather and Bowling Ball Fall at the Same Speed. URL: <https://www.discovermagazine.com/the-sciences/watch-a-feather-and-bowling-ball-fall-at-the-same-speed> (дата обращения: 21.10.2019).

Для цитирования

Разумный Ю.Н., Купреев С.А. О движении тел на основе изменения кинетического момента // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2019. Т. 20. № 4. С. 267–275. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-4-267-275>

Research paper

On the motion of bodies based on changes in the kinetic moment

Yury N. Razoumny, Sergei A. Kupreev

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

Article history:

Received: November 01, 2019

Revised: November 15, 2019

Accepted: November 22, 2019

Keywords:

movement without mass flow, gravitational field, graviton, motion without overload, EmDrive

The controlled motion of a body in a central gravitational field without mass flow is considered. The possibility of moving the body in the radial direction from the center of attraction due to changes in the kinetic moment relative to the center of mass of the body is shown. A scheme for moving the body using a system of flywheels located in the same plane in near-circular orbits with different heights is proposed. The use of the spin of elementary particles is considered as flywheels. It is proved that using the spin of elementary particles with a Compton wavelength exceeding the distance to the attracting center is energetically more profitable than using the momentum of these particles to move the body. The calculation of motion using hypothetical particles (gravitons) is presented. A hypothesis has been put forward about the radiation of bodies during accelerated motion, which finds indirect confirmation in stellar dynamics and in an experiment with the fall of two bodies in a vacuum. The results can be used in experiments to search for elementary particles with low energy, explain cosmic phenomena and to develop transport objects on new physical principles.

References

1. Beletskii VV, Levin EM. *Dinamika kosmicheskikh trosovykh sistem [Dynamics of space tether systems]*. Moscow: Nauka Publ.; 1990.

2. Beletskii VV. *Ocherki o dvizhenii kosmicheskikh tel [Essays on the motion of space bodies]*. Moscow: LKI Publ.; 2009.

3. Alpatov AP, Beletskii VV, Dranovskii VI, Zakrzhevskii AE, Pirozhenko AV, Troger G, Khoroshilov VS. *Dinamika kosmicheskikh sistem s trosovyimi i sharnirnyimi soedineniyami [Dynamics of space systems with cable and pivot connection]*. Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy; 2007.

4. Pirozhenko AV. Two tethered bodies motion control in the gravitational field by the length variation. *Cosmic Research*. 1990;(4):473–482.

5. Shcherbakov VI. *Orbital'nye manevry kosmicheskoi trosovoi sistemy [Orbital maneuvers of the space*

Yury N. Razoumny, Director of Department of Mechanics and Mechatronics of Academy of Engineering of RUDN University, Director of Academy of Engineering of RUDN University, Doctor of Sciences (Techn.), Professor, full member of Russian Academy of Cosmonautics, full member of International Academy of Astronautics; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1337-5672>, e-LIBRARY SPIN-code: 7704-4720.

Sergei A. Kupreev, Professor of Department of Mechanics and Mechatronics of Institute of Space Technologies, Deputy Director of Academy of Engineering of RUDN University, Doctor of Sciences (Techn.), Docent; kupreev-sa@rudn.ru; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8657-2282>, e-LIBRARY SPIN-code: 2287-2902.

tethered system]. Saint Petersburg: A.F. Mozhaysky Military-Space Academy; 2010.

6. Breakwell JV, Gearhart JW. Pumping a Tethered Configuration to Boost its Orbit Around an Oblate Planet. *NASA, AIAA, and PSN, International Conference on Tethers in Space, Arlington, VA, Sept. 17–19, 1986*.

7. Popov AS. Analysis of the capacity to use a repulsive two-mass space system with periodically formed coupling to perform interorbital flights. *Aerospace MAI Journal*. 2017;24(3):72–77.

8. Aslanov VS, Ledkov AS. *Dynamics of the Tethered Satellite Systems*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited; 2012.

9. Ivanov VA, Kupreev SA, Ruchinskii VS. *Kosmicheskie trosovye sistemy [Space tether systems]: Training manual*. Moscow: Al'fa-M Publ.; 2014.

10. Ivanov VA, Kupreev SA, Liberzon MR. Sblizhenie v kosmose s ispol'zovaniem trosovykh system [The convergence in space with the using of tethered systems]: monograph. Moscow: Khoruzhevskii Publ.; 2010.

11. Isaacs JD, Vine AC, Bradner H, Bachus GE. Satellite elongation into a true “sky-hook”. *Science*. 1996;151(3711):682–683. doi:10.1126/science.151.3711.682.

12. Arcutanov JN. V kosmos bez raket: novaja ideja kosmicheskogo starta [Into space without rockets: a new idea for a space launch]. *Znanije – Sila [Knowledge is Power]*. 1969;(7):25. (In Russ.)

13. Pearson J. The Orbital Tower: A Spacecraft Launcher Using the Earth's Rotational Energy. *Acta Astronautica*. 1975;2(9–10):785–799.

14. Murray CD, Dermott SF. *Solar System Dynamics*. Cambridge University Press; 1999. p. 184.

15. Abbott BP, et al. GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2. *Physical Review Letters*. 2017;118:221101. doi:10.1103/PhysRevLett.118.221101.

16. Prince KC, et al. Coherent control with a short-wavelength free-electron laser. *Nature Photonics*. 2016;10:176–179.

17. Shawyer R. A Theory of Microwave Propulsion for Spacecraft. Theory paper v. 9.3. *New Scientist*. 2006. Available from: <http://www.emdrive.com/>

18. NASA Team Claims 'Impossible' Space Engine Works – Get the Facts. *National Geographic*. 2016, 21 November. Available from: <https://news.nationalgeographic.com/2016/11/nasa-impossible-emdrive-physics-peer-review-space-science/> (accessed: 21.10.2019).

19. *Watch a Feather and Bowling Ball Fall at the Same Speed: An experiment with the fall of two different bodies in a vacuum*. Available from: <https://www.discovermagazine.com/the-sciences/watch-a-feather-and-bowling-ball-fall-at-the-same-speed> (accessed: 21.10.2019).

For citation

Razoumny YN, Kupreev SA. On the motion of bodies based on changes in the kinetic moment. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(4):267–275. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-4-267-275>. (In Russ.)

DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-4-276-284
УДК 629.783

Научная статья

Разработка схемы подкрепления отражающей обшивки рефлектора методами параметрической и топологической оптимизации

Е.К. Филина, Е.С. ГолубевМосковский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Российская Федерация, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

К.В. МихайловскийМосковский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1**М.Ю. Архипов**

Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Российская Федерация, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

История статьи:

Поступила в редакцию: 04 октября 2019

Доработана: 15 ноября 2019

Принята к публикации: 22 ноября 2019

Ключевые слова:

зеркальная космическая антенна, рефлектор, схема подкрепления, ребра, углепластик, параметрическая оптимизация, топологическая оптимизация, статический анализ, термодеоформации

Проектирование оптимальной схемы подкрепления обшивки размеростабильного рефлектора для достижения конструктивно-массового совершенства представляет интерес вследствие необходимости снижения поверхностной плотности и увеличения жесткости современных зеркальных космических антенн космических аппаратов. На сегодняшний день системы численного инженерного анализа позволяют разрабатывать такие конструкции как традиционными способами, например параметрической оптимизацией, так и способами, новыми в области создания рефлекторов, – топологической оптимизацией. В работе для проектирования схемы подкрепления размеростабильного рефлектора зеркальной космической антенны, функционирующей в составе космического аппарата на геостационарной орбите, используется параметрическая и топологическая оптимизация. Представлены алгоритмы создания схемы подкрепления, включающие в себя этапы постановки задачи оптимизации, разработки геометрии и проведения серии поверочных расчетов. Рассмотрен ряд вариантов конструкции рефлектора зеркальной космической антенны при действии нагрузок на этапе выведения, температурных перепадов в условиях близких к эксплуатационным, а также выполнен модальный анализ. Произведено сравнение разработанных схем подкрепления разными методами. Выполненные исследования позволили разработать оптимальную схему подкрепления обшивки зеркальной космической антенны с помощью методов параметрической и топологической оптимизации. Установлено, что разработанная с помощью оптимизации схема подкрепления отражающей обшивки рефлектора зеркальной космической антенны позволяет обеспечить в условиях эксплуатации необходимое среднеквадратичное отклонение поверхности относительно теоретического параболоида.

Введение

Рефлекторы зеркальных космических антенн широко используются в современных космических

аппаратах, например спутниках различного назначения, и обсерваториях [1–3]. Разработку конструкции рефлектора можно разделить на три этапа: выбор материала и технологии изготовления, выбор схемы крепления рефлектора и схемы подкрепления отражающей обшивки. На сегодняшний день для решения задачи оптимального проектирования схемы подкрепления отражающей обшивки рефлектора зеркальных космических антенн применяются в основном два подхода: метод параметрической оптимизации и метод топологической оптимизации.

Филина Елена Константиновна, аспирант кафедры СМ13 «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ имени Н.Э. Баумана, инженер Астрокосмического центра ФИАН.

Михайловский Константин Валерьевич, доцент кафедры СМ13 «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ имени Н.Э. Баумана, кандидат технических наук; konst_mi@mail.ru.

Архипов Михаил Юрьевич, старший научный сотрудник Астрокосмического центра ФИАН, кандидат технических наук.

Голубев Евгений Сергеевич, аспирант кафедры СМ12 «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ имени Н.Э. Баумана, ведущий инженер Астрокосмического центра ФИАН.

© Филина Е.К., Михайловский К.В., Архипов М.Ю., Голубев Е.С., 2019

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

Параметрическая оптимизация [4–6] заключается в том, что разработчик варьирует параметры заданной геометрии (высоту или толщину ребер, например) и на основе поверочных расчетов и накопленного опыта выбирает значения, наилучшим образом обеспечивающие конструктивные требования (рис. 1). При необходимости доработки конструкции значения параметров изменяют и повторяют расчет. Таким образом, процесс характеризуется итеративностью. Для топологической оптимизации [7–14] разработчик создает конечно-элементную модель (КЭМ) конструкции, задает граничные условия, нагрузки и область оптимизации (рис. 1). Далее решается задача оптимизации по целевой функции (минимум массы, максимум жесткости) с учетом ограничений (максимальные напряжения или прогибы). В результате получается распределение материала по объему, требующее доработки с учетом конструктивных и технологических особенностей изделия.



Рис. 1. Разработка схемы подкрепления отражающей обшивки рефлектора методами параметрической и топологической оптимизации

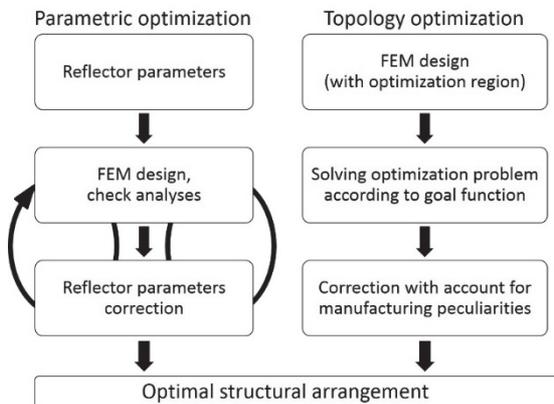


Figure 1. Design of the structural arrangement for a space reflector via parametric and topology optimization

Цель данной работы заключалась в разработке оптимальной сверхлегкой схемы подкрепления обшивки зеркальной космической антенны из полимерного композиционного материала с использованием методов параметрической и топологической оптимизации.

1. Характеристики материала рефлектора

Объектом исследования выбран параболический тонкостенный рефлектор зеркальной космической антенны, функционирующий в составе космического аппарата на геостационарной орбите.

Рефлектор изготовлен из углепластика на основе высокомодульной углеродной нити M55J с модулем упругости не менее 540 ГПа и эпоксидного связующего. Толщина монослоя составляет 0,06 мм. Схема армирования обшивки рефлектора зеркальной космической антенны и схемы подкрепления выбрана: $[[0/90/+45/-45]]_n$ sym. Характеристики монослоя углепластика приведены в табл. 1. По известным характеристикам монослоя рассчитаны свойства углепластика с выбранной схемой армирования с помощью соотношений механики композитных сред.

Таблица 1

Характеристики монослоя материала рефлектора [Table 1. Ply characteristics of the reflector material]

Модуль упругости вдоль оси укладки волокон E_1 , ГПа [Young's modulus in fiber direction E_1 , GPa]	340
Модуль упругости перпендикулярно оси укладки волокон E_2 , ГПа [Young's modulus orthogonal to fiber direction E_2 , GPa]	8
Коэффициент Пуассона ν [Poisson's ratio ν]	0,3
Модуль сдвига в плоскости армирования G_{12} , ГПа [Shear modulus G_{12} , GPa]	4,6
ТКЛР вдоль оси укладки волокон (средний в диапазоне), 1/К [CTE in fiber direction $\bar{\alpha}_1$ (average value in the temperature range), 1/K]	$-1,1 \cdot 10^{-7}$
ТКЛР перпендикулярно оси укладки волокон (средний в диапазоне), 1/К [CTE orthogonal to fiber direction $\bar{\alpha}_2$ (average value in the temperature range), 1/K]	$4,0 \cdot 10^{-5}$
Плотность ρ , кг/м ³ [Density ρ , kg/m ³]	1550

2. Разработка схемы подкрепления отражающей обшивки рефлектора с помощью параметрической оптимизации

Рассмотрены три варианта конструкции рефлектора зеркальной космической антенны (рис. 2) при действии нагрузок на этапе выведения, темпера-

турных перепадов в условиях, близких к эксплуатационным, а также выполнен модальный анализ. Геометрические параметры рефлектора приведены в табл. 2. Для параметрической оптимизации использовался решатель Nastran с программой Femap. Данные схемы подкрепления обшивки рефлектора и, соответственно, геометрические модели выбраны на основе предварительного параметрического моделирования.

Для выбора схемы подкрепления сформулирована следующая задача оптимизации:

- 1) целевой функцией является масса рефлектора, которая должна стремиться к минимальному значению: $m \rightarrow \min$;
- 2) ограничением при оптимизации выбрана частота первого тона собственных колебаний рефлектора: $\nu_1 \geq 40$ Гц;
- 3) параметром оптимизации считается высота ребер жесткости (как наиболее характерная для первоначального моделирования схемы подкрепления): h_r ;
- 4) дополнительным ограничением выбрано требование к точности отражающей поверхности рефлектора по максимальному среднеквадратическому отклонению (СКО) под действием температурных нагрузок, соответствующих эксплуатационным: $\text{СКО} \leq 10$ мкм.

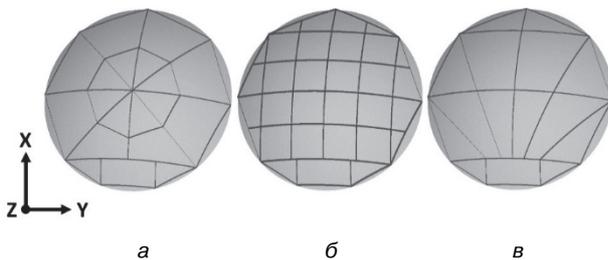


Рис. 2. Три варианта схем подкрепления отражающей обшивки рефлектора
[Figure 2. Three variants of the structural arrangement for the reflector]

Таблица 2

Геометрические параметры рефлектора [Table 2. Parameters of the reflector geometry]	
Диаметр D , мм [Diameter D , mm]	1200
Фокусное расстояние F , мм [Focal length F , mm]	450
Толщина рабочей поверхности t_w , мм [Thickness of the work facesheet t_w , mm]	2
Толщина ребер жесткости t_r , мм [Thickness of the ribs t_r , mm]	1

На первом этапе определения оптимальной схемы подкрепления отражающей обшивки рефлек-

тора проведен модальный анализ. Выбранные геометрические модели рефлектора разбивались на оболочечные 4-узловые конечные элементы второго порядка типа Laminate. Для получения сетчатонезависимого решения проводился расчет на разных конечно-элементных моделях, и в итоге выбраны модели с общим количеством элементов не менее 40 000. Считается, что рефлектор зеркальной космической антенны находится в раскрытом положении и крепится к космическому аппарату откидной штангой, которая учитывается как жесткая заделка. Результаты модального анализа представлены в табл. 3.

Для 1-го варианта рефлектора требуемая частота первого тона достигалась при высоте ребер схемы подкрепления, равной 29 мм, для 2-го варианта рефлектора – 42 мм, а для 3-го варианта рефлектора – 26 мм. Наименьшей массой обладал 3-й вариант схемы подкрепления рефлектора, следовательно, среди рассмотренных у него наилучшее соотношение минимума массы и требуемой частоты первого тона, поэтому он использовался для последующего параметрического моделирования.

Таблица 3

Результаты модального анализа
[Table 3. Results of the modal analysis]

Рефлектор 1 [Reflector 1]			Рефлектор 2 [Reflector 2]			Рефлектор 3 [Reflector 3]		
h_r , мм	ν_1 , Гц	m , кг	h_r , мм	ν_1 , Гц	m , кг	h_r , мм	ν_1 , Гц	m , кг
25	34,80	4,31	25	25,08	4,39	25	38,30	4,29
30	41,70	4,39	30	29,48	4,50	30	46,79	4,38
40	56,20	4,57	40	38,65	4,71	40	63,70	4,55
29	40,29	4,38	42	40,58	4,75	26	40,12	4,31

Расчет напряженно-деформированного состояния рефлектора на этапе выведения. Для выбора оптимальной схемы подкрепления обшивки рефлектора рассмотрен один из расчетных случаев выведения на ракета-носителе «Протон-М». Вдоль продольной оси (X) действует нагрузка 5,1 г, вдоль поперечной оси (Y) нагрузка составляет 1,4 г. Согласно результатам расчета (рис. 3), наибольшие значения главных напряжений и максимальные сдвиговые напряжения не превышают 4,5 и 2,5 МПа соответственно, что свидетельствует о достаточном запасе прочности рефлектора на этапе выведения.

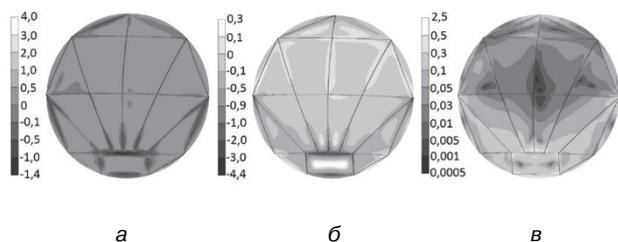


Рис. 3. Наименьшие (а), наибольшие (б) главные напряжения и максимальные сдвиговые (в) напряжения, МПа
[Figure 3. Minimum (a), maximum (b) principal stresses and maximum (v) shear stresses, MPa]

Определение температурных перепадов и деформаций рефлектора в условиях близких к эксплуатационным. В условиях эксплуатации на рефлектор зеркальной космической антенны в составе аппарата на геостационарной орбите воздействует солнечное излучение (прямое и отраженное от Земли) и собственное излучение Земли [15]. Из-за разности интенсивности теплового потока в тени Земли и в области освещения рефлектор сначала охлаждается до температуры $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже, а затем подвергается нагреву до температуры $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ [16], что оказывает существенное влияние на характеристики отражающей поверхности из-за температурных деформаций и напряжений. В работе приведен один из расчетных случаев, полученный на основе моделирования орбитального полета, когда на отражающей поверхности рефлектора возникает температурный градиент от $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ на верхней области до $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ на нижней. Выбранный углепластик обеспечивает работоспособность в необходимом интервале температур без снижения физико-механических характеристик. Полученное температурное поле на рефлекторе представлено на рис. 4.

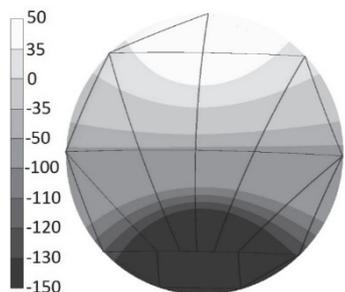


Рис. 4. Температурное поле на рефлекторе, $^{\circ}\text{C}$
[Figure 4. Temperature field on the reflector, $^{\circ}\text{C}$]

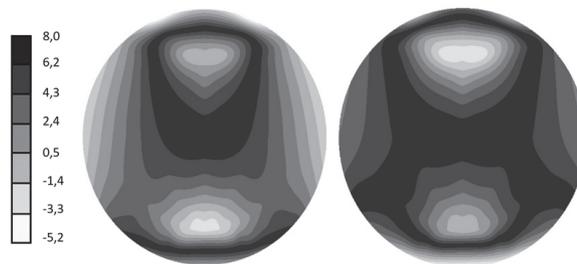


Рис. 5. Отклонения отражающей обшивки рефлектора относительно теоретического параболоида (слева) и ПНП (справа), мкм
[Figure 5. Surface deformation a space reflector related to the theoretical (left) and best-fit (right) paraboloids, μm]

Далее с учетом температурных градиентов и условия закрепления рефлектора определялось напряженно-деформированное состояние (НДС). В результате моделирования установлено, что СКО отражающей поверхности относительно теоретического параболоида с фокусным расстоянием $F = 450\text{ мм}$ составляет $3,1\text{ мкм}$, СКО относительно параболоида наилучшего приближения (ПНП) [17] с фокусным расстоянием $F = 449,99\text{ мм}$ составляет $1,5\text{ мкм}$. Таким образом, выбранная схема подкрепления отражающей обшивки рефлектора обеспечивает соответствие требованию к точности отражающей поверхности (п. 4 постановки задачи оптимизации) и считается оптимальной. На рис. 5 приведены отклонения отражающей обшивки рефлектора относительно теоретического параболоида и ПНП.

3. Разработка схемы подкрепления отражающей обшивки рефлектора с помощью топологической оптимизации

Для топологической оптимизации схемы подкрепления обшивки рефлектора построена первоначальная геометрическая модель с параболической отражающей поверхностью толщиной 2 мм и упрощенно заданной областью ребер, высота которой составляет 26 мм , что соответствует высоте ребер выбранной модели на основе параметрической оптимизации. Учтено действие нагрузок на этапе выведения, температурных перепадов в условиях, близких к эксплуатационным, а также выполнен модальный анализ. Топологическая оптимизация рефлектора осуществлена в модуле Topology Optimization среды численного инженерного анализа ANSYS. Для получения сетчато-независимого решения проведен расчет на разных конечно-элементных моделях, и в итоге

выбрана модель с общим количеством элементов не менее 80 000 с учетом рекомендаций к модулю Topology Optimization [18] и обеспечения по толщине ребра минимум четырех монослоев для необходимой жесткости.

Для выбора схемы подкрепления сформулирована следующая задача оптимизации:

1) целевой функцией является масса рефлектора, которая должна стремиться к минимальному значению: $m \rightarrow \min$;

2) ограничением при оптимизации считается прогиб рефлектора под действием инерционной нагрузки: $w_{\max} = 1,2$ мм (эквивалент жесткости конструкции по первому изгибному тону);

3) параметром оптимизации выбрана функция распределения материала по объему конструкции: ρ ;

4) дополнительным ограничением выбрано требование к точности отражающей поверхности рефлектора под действием температурных нагрузок, соответствующих эксплуатационным: суммарное СКО ≤ 10 мкм.

Расчет напряженно-деформированного состояния рефлектора на этапе выведения. Рассмотрен один из расчетных случаев выведения на ракета-носителе «Протон-М». Вдоль продольной оси (X) действует нагрузка 5,1 g, вдоль поперечной оси (Y) нагрузка составляет 1,4 g. В качестве закрепления выбрана жесткая заделка, которая схематично представлена на рис. 6. В результате моделирования определено, что максимальный прогиб конструкции w_{\max} равен 1,2 мм. Данная величина означает, что эквивалентная конструкция рефлектора, обладающая частотой собственных колебаний первого тона, равной 40 Гц, под действием инерционной нагрузки имеет прогиб, равный 1,2 мм.

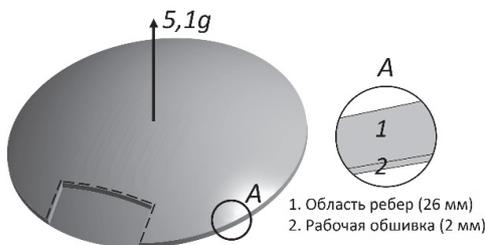


Рис. 6. Геометрическая модель для выбора схемы подкрепления рефлектора методом топологической оптимизации [Figure 6. Geometrical model for design of the reflector via topology optimization]

Результатом моделирования задачи оптимизации считалось распределение материала по за-

данному объему. Приемлемая величина функции распределения, согласно рекомендациям [18], выбиралась в диапазоне 0,3–0,8 и для решения данной задачи принята равной 0,7 (рис. 7). На рис. 7 представлена половина геометрической модели рефлектора, потому что использовалось условие симметрии для сокращения временных и вычислительных ресурсов. На основе решения задачи топологической оптимизации схемы подкрепления рефлектора построена геометрическая модель, которая учитывала данные результаты, а также технологические особенности изготовления (рис. 7). Однако, поскольку полученные ребра имели большую толщину по сравнению с доработанной моделью, для достижения эквивалентной изгибной жесткости высота ребер в модели увеличена до 30 мм, и масса рефлектора составила 4,58 кг.

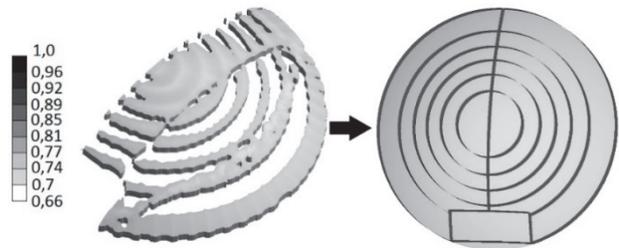


Рис. 7. Модель рефлектора, полученного методом топологической оптимизации [Figure 7. Reflector designed via topology optimization]

Для данной геометрической модели рефлектора выполнен модальный анализ и установлено, что частота 1-го тона собственных колебаний в раскрытом состоянии равна 27 Гц, что меньше требований к 1-му тону. Результаты анализа нагрузок на этапе выведения (рис. 8) показали, что наименьшие и наибольшие значения главных напряжений и максимальные сдвиговые напряжения не превышают 2,5, 7,4 и 3,4 МПа соответственно, что свидетельствует о достаточном запасе прочности рефлектора на этапе выведения.

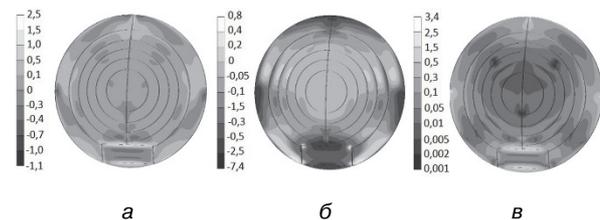


Рис. 8. Наименьшие (а), наибольшие (б) главные напряжения и максимальные сдвиговые (в) напряжения, МПа [Figure 8. Minimum (a), maximum (b) principal stresses and maximum shear (v) stresses, MPa]

Определение температурных перепадов и деформаций рефлектора в условиях, близких к эксплуатационным. По аналогии с параметрической оптимизацией рассмотрен один из расчетных случаев, когда на отражающей поверхности рефлектора возникает температурный градиент от +50 °С на верхней области до –150 °С на нижней. Далее с учетом температурных градиентов и условия закрепления рефлектора определялось НДС. В результате моделирования определено, что СКО отражающей поверхности рефлектора относительно теоретического параболоида с фокусным расстоянием $F = 450$ мм составляет 3,3 мкм, СКО относительно ПНП [17] с фокусным расстоянием $F = 449,99$ мм составляет 1,7 мкм (рис. 9). Таким образом, схема подкрепления отражающей обшивки рефлектора, разработанная методом топологической оптимизации, обеспечивает выполнение требования к точности, но требует увеличения частоты первого тона собственных колебаний.

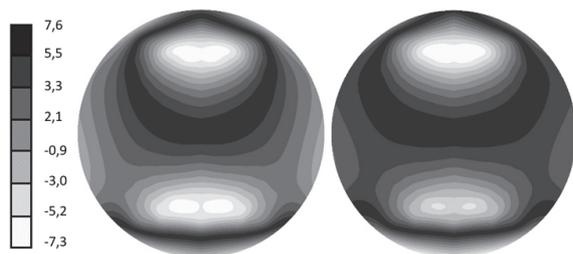


Рис. 9. Отклонения отражающей обшивки рефлектора относительно теоретического параболоида (слева) и ПНП (справа), мкм
[Figure 9. Surface deformation map related to the theoretical (left) and best-fit paraboloids (right), μm]

В табл. 4 обобщены результаты выбора оптимальной схемы подкрепления обшивки рефлектора зеркальной космической антенны, полученной с помощью параметрической (1-й рефлектор) и топологической (2-й рефлектор) оптимизации. Определено, что 1-й рефлектор характеризуется более высокой жесткостью и точностью отражающей поверхности и обладает меньшей массой, а 2-й рефлектор обеспечивает требования по точности отражающей поверхности, но требует увеличения частоты первого тона собственных колебаний. На основе результатов моделирования задачи топологической оптимизации установлено, что для достижения лучших показателей необходимо последовательно адаптировать геометрическую модель рефлектора с учетом действия эксплуатационных

нагрузок уменьшая тем самым область функции распределения материала.

Таблица 4

Характеристики рефлекторов, полученных параметрической и топологической оптимизацией
 [Table 4. Characteristics of the reflectors designed via parametric and topology optimization]

Характеристика рефлектора [Characteristic of the reflector]	Рефлектор 1 [Reflector 1]	Рефлектор 2 [Reflector 2]
Частота собственных колебаний 1-го тона ν_1 , Гц [Eigenfrequency of the 1 st mode ν_1 , Hz]	40	27
Масса M , кг [Mass M , kg]	4,30	4,58
Высота ребер h_r , мм [Height of the ribs h_r , mm]	26	30
СКО относительно теоретического параболоида ($F = 450$ мм), мкм [Surface figure error (estimated in RMS) with respect to the theoretical paraboloid ($F = 450$ mm), μm]	3,1	3,3
СКО относительно ПНП ($F = 449,99$ мм), мкм [Surface figure error (estimated in RMS) with respect to the best-fit paraboloid ($F = 449,99$ mm), μm]	2,2	3,1

Таблица 5

Временные и вычислительные затраты разработки рефлектора
 [Table 5. Time and computational consumption of the reflector design]

	Параметрическая оптимизация [Parametric optimization]	Топологическая оптимизация [Topology optimization]
Емкость вычислительных затрат одного расчета (процессор Intel®Core™ i7, объем памяти 64 Гб) [Computational consumption per analysis (Intel®Core™ i7, 64 GB)]	≈ 1,5–3 мин [min]	≈ 60 мин [min]
Трудоемкость разработки конструкции [Time consumption]	≈ 2 дня × 3 схемы подкрепления = 6–7 дней [≈ 2 days × 3 structural arrangements = 6–7 days]	≈ 2 дня [days]

В табл. 5 приведено сравнение временных и вычислительных затрат для рассматриваемых методов оптимизации. Разработка схемы подкрепления отражающей обшивки рефлектора методом

параметрической оптимизации более продолжительна по сравнению с разработкой методом топологической оптимизации, однако топологическая оптимизация требует значительно больших ресурсов вычислительной техники (объема памяти и мощности процессора).

Заключение

Для достижения конструктивно-массового совершенства схемы подкрепления обшивки рефлектора зеркальной космической антенны проведена ее оптимизация с учетом действия нагрузок на стадии выведения, температурных перепадов в условиях, близких к эксплуатационным, а также анализа собственных форм колебаний.

Разработанная с помощью параметрической оптимизации схема подкрепления обшивки рефлектора зеркальной космической антенны позволила обеспечить в условиях эксплуатации СКО отражающей поверхности относительно теоретического параболоида с фокусным расстоянием $F = 450$ мм около 3,1 мкм и СКО относительно ПНП с фокусным расстоянием $F = 449,99$ мм в 1,5 мкм.

Разработанная с помощью топологической оптимизации схема подкрепления обшивки рефлектора зеркальной космической антенны обеспечила СКО отражающей поверхности относительно теоретического параболоида 3,3 мкм и СКО относительно ПНП – 1,7 мкм.

Показано, что для выбора схемы подкрепления обшивки рефлектора зеркальной космической антенны можно применять как параметрическую, так и топологическую оптимизацию, однако топологическая оптимизация потребует существенно больших ресурсных затрат при моделировании с помощью программ инженерного анализа и из-за последовательного выполнения расчетов для достижения лучших показателей с учетом уменьшения области функции распределения материала.

Список литературы

1. *Reznik S.* Thermal regimes of space composite structures. Part I // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences. 2018. Vol. 194. P. 01048. DOI: 10.1051/mateconf/201819401048.
2. *Pilipenko S., Smirnov A., Kardashev N.* Current status of the space mission Millimetron // Frontier Research in Astrophysics. SISSA Medialab. 2016. Vol. 237. P. 037. DOI: 10.22323/1.237.0037.

3. *Clampin M.* Status of the James WEBB space telescope (JWST) // Space Telescopes and Instrumentation 2008: Optical, Infrared, and Millimeter. International Society for Optics and Photonics. 2008. Vol. 7010. P. 70100L. DOI: 10.1117/12.790388

4. *Бабкина Л.А., Сорокин Д.В.* Параметрический анализ параболической антенны космического аппарата с многовариантной схемой подкрепления // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. Т. 64. № 4. С. 1–9. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-4-1611.

5. *Yoder P., Jr., Vukobratovich D.* Opto-Mechanical Systems Design. Design and Analysis of Opto-Mechanical Assemblies. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. Vol. 2. P. 97–101.

6. *Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Novikov A.D.* Comparison of space antennas mirror reflectors parameters made of composite materials // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences. 2017. Vol. 110. P. 01072. DOI: 10.1051/mateconf/201711001072

7. *Qu Y., Wang W., Liu B., Li X.* Topology Optimization Design of Space Rectangular Mirror // Proceedings SPIE 10154, Advanced Optical Design and Manufacturing Technology and Astronomical Telescopes and Instrumentation. 1015421. 2016, Oct. 19, Beijing, China. DOI: 10.1117/12.2247396.

8. *Liu J., Jiang B.* Topology Optimization Design of a Space Mirror // Proceedings SPIE 9795: Selected Papers of the Photoelectronic Technology Committee Conferences. 97952Y. 2015, June – July, Hefei, Suzhou and Harbin, China. DOI: 10.1117/12.2209031.

9. *Budinoff J.G., Michels G.J.* Design and Optimization of the Spherical Primary Optical Telescope (SPOT) Primary Mirror Segment // Proceedings SPIE 5877. Optomechanics 2005. 587711. 2005, Sept. 9, San Diego, US. DOI: 10.1117/12.626566.

10. *Park K.-S., Lee J.H., Youn S.-K.* Lightweight mirror design method using topology optimization // Optical engineering. 2005. Vol. 44. No. 5. P. 053002. DOI: 10.1117/1.1901685.

11. *Liu G., Guo L., Wang X., Wu Q.* Topology and parametric optimization based lightweight design of a space reflective mirror // Optical engineering. 2018. Vol. 57. No. 7. P. 075101. DOI: 10.1117/1.OE.57.7.075101.

12. *Liu S., Hu R., Li Q., Zhou P., Dong Z., Kang R.* Topology optimization-based lightweight primary mirror design of a large-aperture space telescope // Applied optics. 2014. Vol. 53. No. 35. Pp. 8318–8325. URL: <https://doi.org/10.1364/AO.53.008318>

13. *Leea Dong-Chan, Lee Jeong-Ick.* Structural optimization design for large mirror // Optics and Lasers in Engineering. 2004. Vol. 42. Pp. 109–117. DOI: 10.1016/S0143-8166(03)00079-4.

14. *Eschenauer H.A., Olhoff N.* Topology optimization of continuum structures: a review // Applied Mechanics Reviews. 2001. Vol. 54. No. 4. Pp. 331–390. URL: <https://doi.org/10.1115/1.1388075>

15. Денисова Л.В., Калинин Д.Ю., Резник С.В. Теоретические и экспериментальные исследования тепловых режимов сетчатых рефлекторов космических антенн // Вестник Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2011. № 1. С. 92–105.

16. Резник С.В., Денисов О.В., Чуднов И.В. Основные подходы к формированию программы термовакуумных испытаний прецизионных рефлекторов зеркальных космических антенн // Наука и образование: научное издание МГТУ имени Н.Э. Баумана. 2013. № 8. С. 167–184.

17. Архипов М.Ю. Разработка моделей для исследования деформированного состояния рефлектора круп-

ногабаритного космического радиотелескопа лепесткового типа: дис. ... канд. техн. наук. М., 2002.

18. ANSYS User's Manual. ANSYS Inc., 2016.

Для цитирования

Филина Е.К., Михайловский К.В., Архипов М.Ю., Голубев Е.С. Разработка схемы подкрепления отражающей обшивки рефлектора методами параметрической и топологической оптимизации // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 4. С. 276–284. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-4-276-284>

Research paper

Design of the structural arrangement for a space reflector via parametric and topology optimization

Elena K. Filina, Evgenii S. Golubev

Bauman Moscow State Technical University, 5 2-ya Baumanskaya St., bldg. 1, Moscow, 105005, Russian Federation
Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, 84/32 Profsoyuznaya St., Moscow, 117997, Russian Federation

Konstantin V. Mikhailovskiy

Bauman Moscow State Technical University, 5 2-ya Baumanskaya St., bldg. 1, Moscow, 105005, Russian Federation

Mikhail Yu. Arkhipov

Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, 84/32 Profsoyuznaya St., Moscow, 117997, Russian Federation

Article history:

Received: October 04, 2019

Revised: November 15, 2019

Accepted: November 22, 2019

Keywords:

space antenna, reflector, structural arrangement, ribs, carbon fiber reinforced plastic, parametric optimization, topology optimization, static analysis, thermal deformations

Development of the optimal structural arrangement for a reflector with the aim to improve its mass and design is of importance due to the necessity to increase areal density and decrease rigidity of the modern space antennas vehicles. Currently, CAE-systems allow to design reflectors using both traditional methods, for example, parametric optimization, and methods which are innovative in this field, such as topology optimization. The paper compares two methods of the structural arrangement design for a thin dimensionally stable reflector operating as part of a geostationary spacecraft: parametric and topology optimization. The algorithms of the structural arrangement development which include the statement of the optimization problem, geometry design and a number of check analyses are presented. A number of structural of a space reflector design under the action of loads at the stage of launch, temperature gradients at the exploitation conditions and modal analysis is performed. The designed reflectors are compared. The studies performed allowed us to develop the optimal structural arrangement for a space reflector using the parametric and topology optimization. The optimal structural arrangement for a space reflector using the optimization could be produced surface figure error (estimated in RMS) with respect to the theoretical paraboloid.

References

1. Reznik S. Thermal regimes of space composite structures. Part I. *MATEC Web of Conferences*. EDP

Elena K. Filina, post-graduate student of the Rocket-Space Composite Structures Department (SM13) at BMSTU, engineer at Astro Space Center of LPI RAS.

Konstantin V. Mikhailovskiy, Associate Professor of the Rocket-Space Composite Structures Department (SM13) at BMSTU, PhD in Engineering Sciences; konst_mi@mail.ru.

Mikhail Yu. Arkhipov, senior researcher at Astro Space Center of LPI RAS, PhD in Engineering Sciences.

Evgenii S. Golubev, post-graduate student of the Technologies of Space-Rocket Mechanical Engineering Department (SM12) at BMSTU, lead engineer at Astro Space Center of LPI RAS.

Sciences. 2018;194:01048. Available from: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819401048>

2. Pilipenko S, Smirnov A, Kardashev N. Current status of the space mission Millimetron. *Frontier Research in Astrophysics*. SISSA Medialab. 2016;237:037. Available from: <https://doi.org/10.22323/1.237.0037>.

3. Clampin M. Status of the James WEBB space telescope (JWST). *Space Telescopes and Instrumentation 2008: Optical, Infrared, and Millimeter*. International Society for Optics and Photonics. 2008;7010:70100L. Available from: <https://doi.org/10.1117/12.790388>.

4. Babkina LA., Sorokin DV. Parametric Analysis of the Spacecraft Parabolic Antenna with a Multivariate Reinforcement Scheme. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2017;64(4):1–9. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-4-1611. (In Russ.)
5. Yoder PJr, Vukobratovich D. *Opto-Mechanical Systems Design. Design and Analysis of Opto-Mechanical Assemblies*. 4th ed. Boca Raton: CRC Press; 2015. vol. 2. p. 97–101.
6. Reznik SV, Prosuntsov PV, Novikov AD. Comparison of space antennas mirror reflectors parameters made of composite materials. *MATEC Web of Conferences. EDP Sciences*. 2017;110:01072. Available from: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711001072>
7. Qu Y, Wang W, Liu B, Li X. Topology Optimization Design of Space Rectangular Mirror. *Proceedings of SPIE 10154, Advanced Optical Design and Manufacturing Technology and Astronomical Telescopes and Instrumentation, 1015421, 2016, Oct. 19, Beijing, China*. DOI: 10.1117/12.2247396.
8. Liu J, Jiang B. Topology Optimization Design of a Space Mirror. *Proceedings SPIE 9795, Selected Papers of the Photoelectronic Technology Committee Conferences, 97952Y, 2015, June – July, Hefei, Suzhou and Harbin, China*. DOI: 10.1117/12.2209031.
9. Budinoff JG, Michels GJ. Design and Optimization of the Spherical Primary Optical Telescope (SPOT) Primary Mirror Segment. *Proceedings SPIE 5877, Optomechanics 2005, 587711, 2005 Sept. 9, San Diego, US*. DOI: 10.1117/12.626566.
10. Park K-S, Lee JH, Youn S-K. Lightweight mirror design method using topology optimization. *Optical engineering*. 2005;44(5):053002. DOI: 10.1117/1.1901685.
11. Liu G, Guo L, Wang X, Wu Q. Topology and parametric optimization based lightweight design of a space reflective mirror. *Optical engineering*. 2018;57(7):075101. DOI: 10.1117/1.OE.57.7.075101.
12. Liu S, Hu R, Li Q, Zhou P, Dong Z, Kang R. Topology optimization-based lightweight primary mirror design of a large-aperture space telescope. *Applied optics*. 2014;53(35):8318–8325. Available from: <https://doi.org/10.1364/AO.53.008318>.
13. Leea Dong-Chan, Lee Jeong-Ick. Structural optimization design for large mirror. *Optics and Lasers in Engineering*. 2004;42:109–117. DOI: 10.1016/S0143-8166(03)00079-4.
14. Eschenauer HA, Olhoff N. Topology optimization of continuum structures: a review. *Applied Mechanics Reviews*. 2001;54(4):331–390. DOI: 10.1115/1.1388075.
15. Denisova LV, Kalinin DYu, Reznik SV. Theoretical and Experimental Studies of Heat-Transfer Modes of Space Antenna Mesh Reflectors. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 2011;1:92–105. (In Russ.)
16. Reznik SV, Denisov OV, Chudnov IV. Main Approaches to Formation of a Thermal Vacuum Test Program of Precision Mirror Reflectors of Space Antennas. *Science and Education: Scientific Edition of Bauman MSTU*. 2013;8:167–184. DOI: 10.7463/0813.0612062.
17. Arkhipov MYu. *Development of models for studies of the deformation state a large space telescope reflectors petal type* (PhD in Engineering Sciences dissertation). Moscow; 2002.
18. *ANSYS User's Manual*. ANSYS Inc.; 2016.

For citation

Filina EK, Mikhailovskiy KV, Arkhipov MY, Golubev ES. Design of the structural arrangement for a space reflector via parametric and topology optimization. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(4):276–284. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-4-276-284>. (In Russ.)



МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-4-285-292

Научная статья

УДК 621.4

Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния юбки поршня двигателя внутреннего сгорания на безмоторном стенде

С.В. Смирнов, В.В. Копылов, А.Р. Макаров, А.А. Воробьев, К.В. Шкарин

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

История статьи:

Поступила в редакцию: 28 октября 2019

Доработана: 27 ноября 2019

Принята к публикации: 29 ноября 2019

Ключевые слова:

дизель, составной поршень, профилирование юбки поршня, напряженно-деформированное состояние, гидродинамические характеристики трения, трение

В статье представлены особенности разработанной авторами методики профилирования юбки поршня, приведены основные параметры, влияющие на условия смазывания юбки поршня и величину механических потерь. В расчетных исследованиях даны основные формулы для определения толщины масляного слоя в сопряжении «юбка поршня – цилиндр» для оценки характера трения. Для определения деформаций используется метод конечных элементов на пространственной модели поршня. Для верификации конечно-элементной модели был разработан стенд для экспериментальных исследований. В статье описаны разработанный стенд, методика проведения и результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния юбки составного поршня, полученные на данном стенде, выполнен сравнительный анализ результатов расчетных и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния юбки составного поршня дизеля. Исследование показало, что разработанный стенд может применяться для верификации математических моделей расчета напряженно-деформированного состояния юбки поршня в опытно-производстве поршней двигателя внутреннего сгорания для ускорения и удешевления процесса разработки их конструкции. Результаты экспериментальных исследований, полученные на стенде, также могут быть использованы в качестве исходных данных для разработанной математической модели динамики движения поршня и профилирования юбки поршня.

Введение

Современными тенденциями развития двигателя внутреннего сгорания (ДВС) являются по-

вышение мощностных и экономических показателей, уменьшение количества вредных выбросов и увеличение ресурса ДВС, что требует тщательной проработки конструкции всех его систем и механизмов [1]. Основная часть механических потерь приходится на цилиндропоршневую группу, которая является основным узлом трения в двигателе, и ее работа должна рассматриваться с точки зрения трибологии при обязательном обеспечении прочности и надежности функционирования [2–5].

Поршень в процессе работы подвергается тепловым, механическим нагрузкам, совершает сложное продольно-поперечное движение в цилиндре. На величину механических потерь определяющее влияние оказывает характер трения в сопряжениях

Смирнов Сергей Владимирович, доцент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН, кандидат технических наук; smimov-sv@rudn.ru; eLIBRARY SPIN-код: 7133-5956, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8887-1745>.

Копылов Владимир Викторович, доцент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН, кандидат технических наук; eLIBRARY SPIN-код: 7535-8716.

Макаров Александр Романович, профессор департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН, кандидат технических наук; eLIBRARY SPIN-код: 9195-4544, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6895-3076>.

Воробьев Александр Алексеевич, аспирант департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН; eLIBRARY SPIN-код: 1782-2846, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3977-9862>.

Шкарин Кирилл Владимирович, ассистент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН; eLIBRARY SPIN-код: 4599-9150.

© Смирнов С.В., Копылов В.В., Макаров А.Р., Воробьев А.А., Шкарин К.В., 2019

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



деталей цилиндропоршневой группы [6]. Одним из эффективных средств влияния на условия смазывания юбки поршня и величину механических потерь является профилирование юбки поршня. Этой теме посвящены научно-исследовательские работы многих исследователей во многих странах мира [7–10].

Методика профилирования должна учитывать деформирование профиля юбки поршня от воздействующих нагрузок при разработке конструкции поршня, обеспечивающей необходимую надежность в условиях воздействия высоких динамических, механических и тепловых нагрузок при минимальной массе, высокой износостойкости контактных поверхностей, низких потерях на трение. Для выполнения этих условий в разработанной нами математической модели [11–13] учитывается динамика движения поршня (как монолитного, так и составного), выполняется решение упруго-гидродинамической задачи для направляющей части поршня с учетом особенностей конструкции поршня. Разработанная математическая модель позволяет на стадии проектирования исследовать влияние на гидродинамические характеристики трения и динамику движения поршня: параметры, характеризующие конструкцию деталей кривошипно-шатунного механизма (КШМ), монтажный зазор в сопряжении «юбка поршня – цилиндр», режим работы двигателя, свойства моторного масла.

1. Расчетные исследования

Упруго-гидродинамическая задача является центральной в разработанной нами [11] математической модели динамики движения поршня.

Для оценки характера трения толщина масляного слоя в сопряжении «юбка поршня – цилиндр» определяется из следующего выражения:

$$h(x, y, t) = h^H(x, y) + m[z - (x - x_{\Pi})\gamma] \cos \theta + \delta_{\Pi}^T(x, y, t) + \delta_{\Pi}^G(x, y, t). \quad (1)$$

Распределение толщин масляного слоя $h^H(x, y)$ определяется профилем поршня в холодном состоянии $u(x, y)$ и монтажным зазором $\Delta_{\text{мз}}$, то есть

$$h^H(x, y) = u(x, y) + \Delta_{\text{мз}}. \quad (2)$$

Второе слагаемое представляет изменение толщины масляного слоя, обусловленное поперечным движением поршня, где m – коэффициент (для на-

груженной стороны $m = +1$, для ненагруженной – $m = -1$); z – перемещение поршня; y – угловая координата в плоскости XY ; x – координата по оси X ; x_{Π} – расстояние от оси пальца до верхней кромки юбки поршня; θ – угол, отсчитываемый от плоскости качания шатуна; γ – угол наклона поршня относительно оси пальца.

Составляющая δ_{Π}^G определяет влияние на толщину масляного слоя деформации, вызванной тепловым расширением поршня и цилиндра. Радиальное расширение поршня считается положительным.

Последнее слагаемое представляет деформации, обусловленные гидродинамическим давлением масляного слоя.

При определении деформаций поршня от тепловой нагрузки δ_{Π}^T и гидродинамического давления δ_{Π}^G применялся метод конечных элементов (МКЭ) с использованием моделей, составленных из объемных элементов. Принималось, что на установившемся режиме работы двигателя тепловые деформации поршня и цилиндра постоянны в течение рабочего цикла.

Для нахождения деформации δ_{Π}^T при тепловом расширении поршня, согласно основным положениям МКЭ, необходимо решить следующую систему уравнений:

$$[K_T] \{\delta_{\Pi}^T\} = \{R_T\}, \quad (3)$$

где $[K_T]$ – матрица жесткости системы элементов пространственной модели поршня; $\{R_T\}$ – вектор узловых усилий системы элементов, вызванных температурным полем; $\{\delta_{\Pi}^T\}$ – вектор-столбец деформаций от тепловой нагрузки.

Аналогично деформации поршня, вызванные действием гидродинамического давления масляного слоя $\delta_{\Pi}^G(x, y, t)$, находились при решении системы линейных уравнений:

$$[K] \{\delta_{\Pi}^G\} = \{P\}, \quad (4)$$

где $[K]$ – матрица жесткости юбки поршня, $\{P\}$ – вектор-столбец сил давления, действующих в узлах, $\{\delta_{\Pi}^G\}$ – вектор-столбец деформаций от гидродинамического давления масляного слоя.

При решении задачи МКЭ возникают погрешности, связанные с геометрическими различиями рассчитываемой детали и ее конечно-элементной модели. Условием достижения оптимального разрешения модели конечными элементами является достижение такого изменения искомого параметра, например деформаций, при котором дальнейшее уменьшение элементов не оказывает существенного влияния на значение расчетных параметров. Данный метод использовался в настоящей работе. На рис. 1 представлены фрагменты конечно-элементной модели юбки поршня.

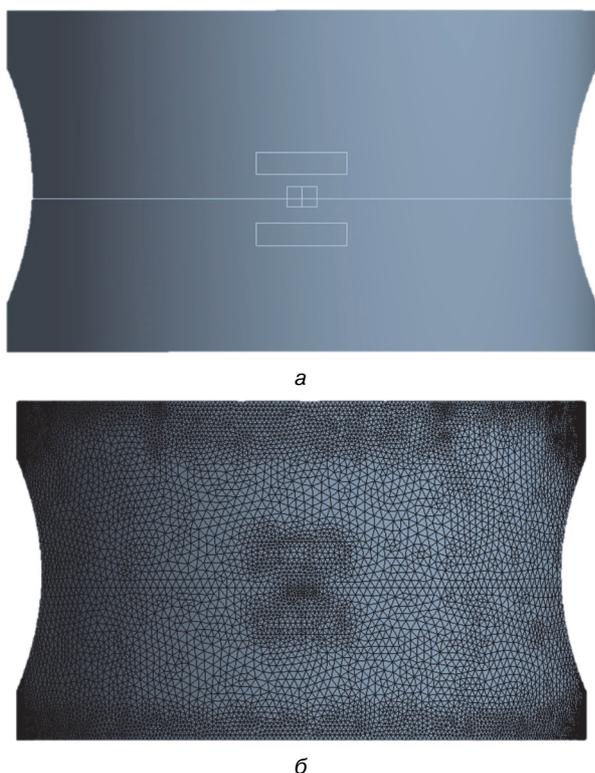


Рис. 1. Модели юбки поршня:

а – объемная, с выделенными зонами установки тензорезисторов;

б – конечно-элементная

[Figure 1. Models of the piston skirt:

a – volumetric, with dedicated zones for installing resistance strain gages;

b – finite element]

При решении задач с помощью МКЭ хорошим способом проверки адекватности полученной модели может служить ее верификация с помощью экспериментального повторения условий для которых проводился расчет.

Для экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния юбки поршня и верификации модуля расчета деформаций поршня от воздействующих нагрузок был разработан специальный стенд.

2. Методика проведения экспериментальных исследований

Объектом исследования была юбка составного поршня дизеля.

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

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

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

3) отсутствие прямой теплопередачи от головки поршня к юбке поршня позволяет уменьшить уровень температур юбки поршня и монтажный зазор пары трения «юбка поршня – гильза цилиндра».

Изображение рассматриваемого поршня представлено на рис. 2.



Рис. 2. Конструкция рассматриваемого поршня
[Figure 2. Piston design]

При проектировании стенда учитывались возможные габариты исследуемых поршней диаметром от 60 до 150 мм, а также возможные материалы, из которых они изготовлены. Стенд включает нагрузочное и измерительное устройства, кото-

рые предусматривают быструю настройку на необходимый размер поршня.

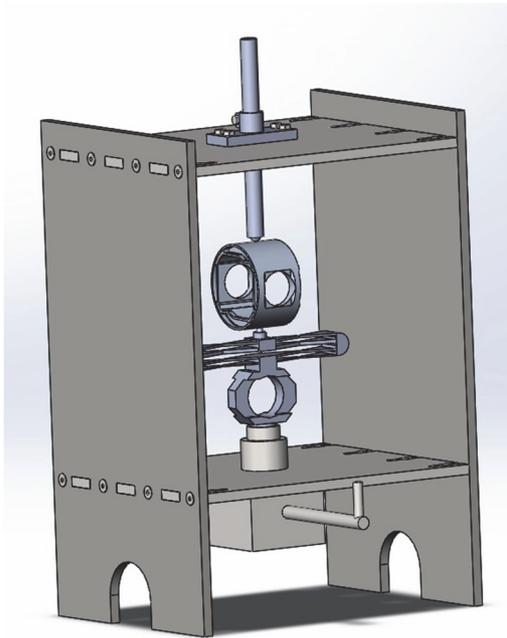


Рис.3. Проект испытательного стенда
[**Figure 3.** Testing bench design]

Конструкция стенда (рис. 3) представляет жесткую пространственную раму, в которой располагаются устройства для дозированного приложения нагрузки на испытываемую деталь и устройство для измерения этой нагрузки. На саму же деталь устанавливаются тензорезисторы для измерения напряжений в теле поршня или используются индикаторы, измеряющие перемещения участков юбки поршня при приложении нагрузки. Для повышения универсальности разрабатываемого стенда предусмотрена система универсальных креплений испытываемых образцов, что позволяет расширить возможности исследований.

Измерения прикладываемой нагрузки производились с помощью рычажного динамометра системы Токаря. Перед началом экспериментальных исследований проводилась тарировка стенда.

Тензометрические измерения проводились с помощью тензостанции ZET017-T8 и тензорезисторов ТКБ01-5-100-23. Схема приложения испытательной нагрузки к юбке поршня и схема установки тензорезисторов на юбке поршня представлены на рис. 4.

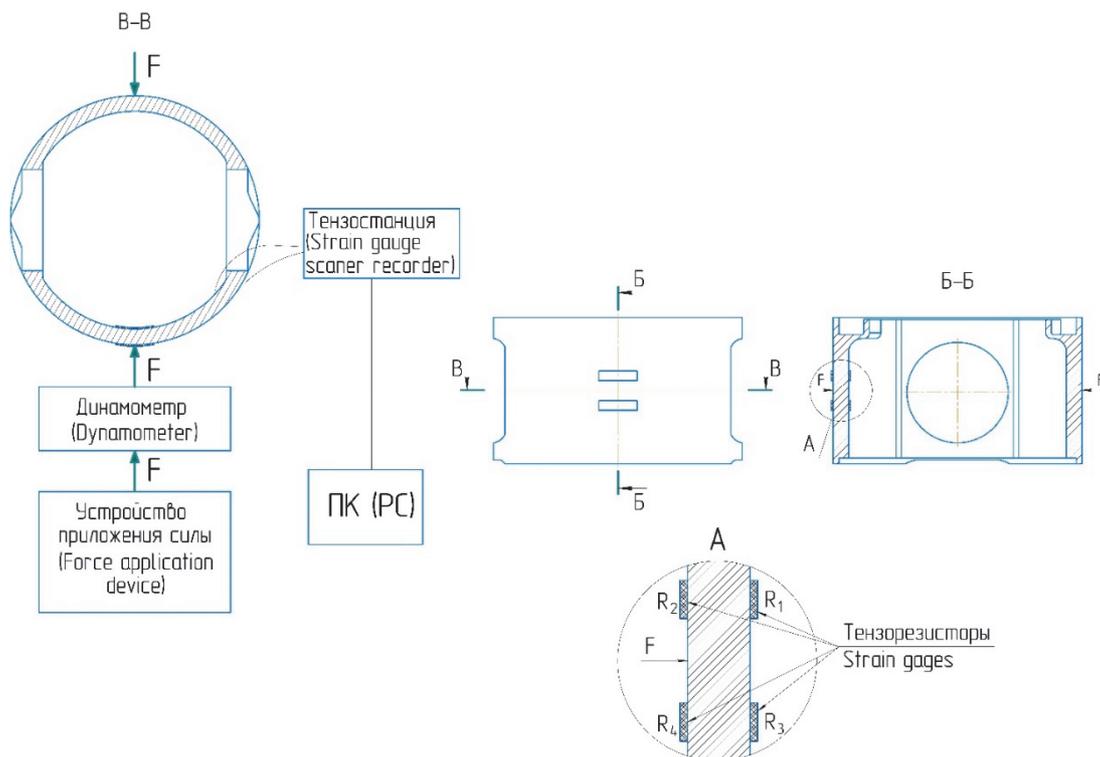


Рис. 4. Блок-схема стенда и схема приложения испытательной нагрузки и расположения тензорезисторов, где F – сила, точно воздействующая на юбку по оси поршневого пальца
[**Figure 4.** Block schematic diagram of testing bench and scheme of application of the test load and the location of the resistance strain gages, where F – force acting pointwise on the skirt along the axis of the piston pin]

На схеме R_1, R_3 – сопротивление резисторов, измеряющих напряжения на внутренней поверхности юбки; R_2, R_4 – сопротивление резисторов, измеряющих напряжения на наружной стороне; u_0 – выходное питание моста; U – питание моста.

Согласно [15], расчет выходного питания моста при известных деформациях тензорезисторов рассчитывается по формуле

$$u_0 = U \cdot K_s \cdot \varepsilon_0, \quad (5)$$

где K_s – K -фактор (коэффициент тензочувствительности тензорезисторов); ε_0 – суммарная деформация тензодатчиков.

Следовательно, при $U = 1\text{В}$, $K_s = 1,99$ получаем $\varepsilon_0 = u_0 / U \cdot K_s = u_0 / 1,99$.

Напряжения определяются по формуле

$$\sigma = \varepsilon_0 \cdot E, \quad (6)$$

где E – модуль упругости исследуемой детали, МПа.

3. Результаты экспериментальных и расчетных исследований

Результаты экспериментальных и расчетных исследований представлены на рис. 5–8. На рис. 5 приведены графики изменения напряжений, измеренные с помощью тензорезисторов и расчетные. Максимальное расхождение экспериментальных и расчетных результатов составило 6 %.

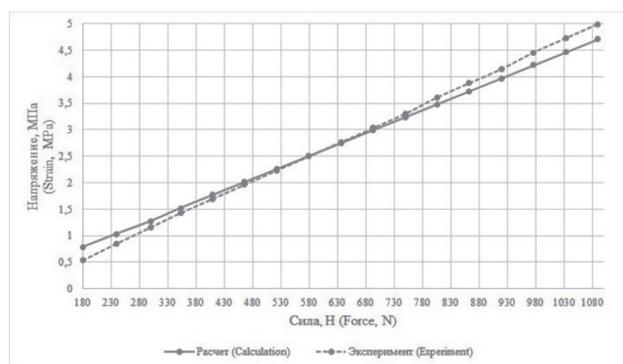


Рис. 5. Графики изменения расчетных и экспериментальных напряжений в юбке поршня
[Figure 5. Graphs of changes in the calculated and experimental stresses in the piston skirt]

Измерение деформации юбки поршня от воздействия нагрузки проводилось как тензорезисторами, так и с помощью индикаторов часового типа.

Тензорезисторами фиксируются деформации изгиба на внешней и внутренней поверхностях

юбки. При этом юбка может рассматриваться как цилиндр, к которому приложены сжимающие усилия. Это позволяет определить действующие напряжения и оценить прочность конструкции поршня.

Однако в математическую модель динамики движения поршня с учетом его деформаций и гидродинамического характера трения [11] должна быть заложена матрица податливости, показывающая перемещение профиля юбки от действия приложенных сил в конкретных точках конструкции юбки. Поэтому для сравнения экспериментальных перемещений с расчетными в конструкции стенда предусмотрено их определение с помощью индикаторов. Схема установки индикатора часового типа для измерения перемещений юбки поршня представлена на рис. 6, а результаты экспериментальных измерений и расчетных исследований – на рис. 7, 8. Удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных позволяет с помощью программы расчета напряженно-деформированного состояния и получить значения напряжений, действующих в юбке, и оценить ее прочность.

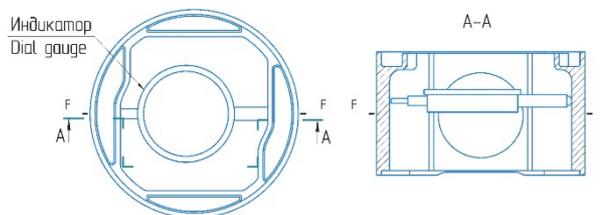


Рис. 6. Схема измерения деформаций индикатором часового типа
[Figure 6. The scheme of measuring deformations by the dial gauge]

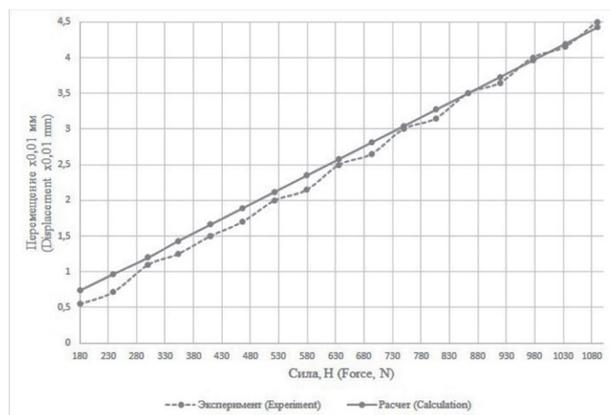


Рис. 7. Графики изменения расчетных и экспериментальных перемещений в зоне установки верхних тензорезисторов
[Figure 7. Graphs of changes in the calculated and experimental displacements in the installation zone of the upper resistance strain gages]

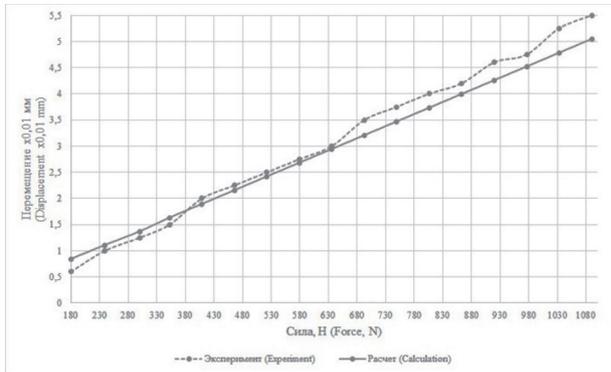


Рис. 8. Графики изменения расчетных и экспериментальных перемещений в зоне установки нижних тензорезисторов [Figure 8. Graphs of changes in the calculated and experimental displacements in the installation zone of the lower resistance strain gages]

Результаты экспериментальных и расчетных исследований показали, что разработанный стенд может использоваться для исследования напряженно-деформированного состояния для различных конструкций, а данная конечно-элементная модель юбки поршня может быть применена в математической модели исследования гидродинамических характеристик трения и последующего профилирования юбки поршня.

Заключение

Разработанный стенд для проведения экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния юбки поршня диаметром от 60 до 150 мм применим для верификации математических моделей расчета напряженно-деформированного состояния юбки поршня в опытно-производстве поршней ДВС для ускорения и удешевления процесса разработки конструкции поршня.

Получены результаты сравнительного анализа расчетных и экспериментальных исследований для юбки составного поршня дизеля. Максимальное расхождение расчетных и экспериментальных результатов составило по напряжениям – 6 %, а по деформациям – до 12 %.

Результаты экспериментальных исследований могут быть использованы в качестве исходных данных для разработанной математической модели динамики движения поршня и профилирования юбки поршня.

Участие авторов: С.В. Смирнов – концепция исследования, написание текста; В.В. Копылов – анализ полученных данных, написание тек-

ста; А.Р. Макаров – анализ полученных данных, написание текста; А.А. Воробьев – проектирование стенда, подготовка и проведение эксперимента, написание текста; К.В. Шкарин – изготовление стенда, написание текста.

Список литературы

1. Danilov I.K., Popova I.M., Moiseev U.I. Analysis and validation of the dynamic method for diagnosing diesel engine connecting rod bearings // *Transport Problems*. 2018. No. 13(1). Pp. 123–133.
2. Путинцев С.В. Механические потери в поршневых двигателях: специальные главы конструирования, расчета и испытаний. М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2011. 228 с.
3. Путинцев С.В., Агеев А.Г. Проверка эффективности применения ребер жесткости юбки поршня малоразмерного дизеля // *Тракторы и сельхозмашины*. 2016. № 11. С. 35–39.
4. Kim K.-S., Shah P., Takiguchi M., Aoki S. A Study of Friction and Lubrication Behavior for Gasoline Piston Skirt Profile Concepts. Part 3 // *SAE Technical Paper*. 2009. No. 01–0193. Pp. 1–5.
5. Дойкин А.А. Расчетно-экспериментальный метод профилирования образующей поршня для повышения ресурса трибосопряжения «поршень – цилиндр» ДВС: дис. ... к. т. н. Челябинск, 2013. 132 с.
6. Abbas M.T., Maspeyrot P., Dekkiche A., Benbrik M., Hacene F.B. Elastohydrodynamic Piston Skirt Lubrication: Effect on Tribological Performances // *ASME/STLE International Joint Tribology Conference*. 2012. Pp. 237–242. DOI: 10.1115/IJTC2012-61129.
7. He Zh. Piston skirt friction loss and dynamic analyses based on FEM method // *Industrial Lubrication and Tribology*. 2018. Vol. 70. Issue 4. Pp. 656–672. DOI: 10.1108/ILT-12-2016-0320.
8. Агеев А.Г. Зависимость длины юбки поршня от скоростного режима работы двигателя // *Молодежный научно-технический вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана*. 2013. № 2. С. 6–10.
9. Allmaier H., Sander D.E., Reich F.M. Measuring friction in automotive engines & determining the contributions of the individual subsystems // *World Tribology Congress*. Torino, 2013. P. 117.
10. Rahnejat H. Tribology and dynamics of engine and powertrain: fundamentals, applications and future trends. Elsevier Science, 2010. 1048 p.
11. Макаров А.Р., Смирнов С.В., Осокин С.В. Математическое моделирование движения поршня в цилиндре // *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2014. Т. 1. № 2 (20). С. 24–30.
12. Костров А.В., Смирнов С.В., Макаров А.Р. Математическое моделирование движения поршня в цилиндре в слое смазочного материала с учетом деформации юбки // *Двигателестроение*. 1990. № 1. С. 7–9.

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

14. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций: учебник. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та. 2011. 56 с.

Для цитирования

Смирнов С.В., Копылов В.В., Макаров А.Р., Воробьев А.А., Шкарин К.В. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния юбки поршня двигателя внутреннего сгорания на безмоторном стенде // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 4. С. 285–292. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-4-285-292>

Research paper

An experimental study of the stress-strain state of the engine piston skirt on the engineless stand

Sergei V. Smirnov, Vladimir V. Kopylov, Alexander R. Makarov, Alexander A. Vorobyev, Kirill V. Shkarin

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

Article history:

Received: October 28, 2019

Revised: November 27, 2019

Accepted: November 29, 2019

Keywords:

diesel, two-piece piston, piston skirt profiling, stress-strain behavior, hydrodynamic friction performance, friction

The article describes the features developed by the authors of the profiling method of the piston skirt, provides the main parameters that affect the lubrication conditions of the piston skirt and the magnitude of mechanical losses. In computational studies, the basic formulas are given for determining the thickness of the oil layer in a piston skirt – cylinder sleeve conjunction to assess the nature of friction. To determine the deformations, the finite element method is used on the spatial model of the piston. To verify the finite element model, a stand for experimental studies was developed. The article describes the developed stand, the methodology and results of experimental studies of the stress-strain state of the two-piece piston skirt obtained at this stand and a comparative analysis of the results of the calculated and experimental studies of the stress-strain state of the two-piece piston skirt of a diesel engine. The research results showed that the developed stand can be used to verify mathematical models for calculating the stress-strain state of the piston skirt in the pilot production of internal combustion engine pistons to accelerate and reduce the cost of the piston design development process, as well as the results of experimental studies obtained at the stand, can be used as initial data for the developed mathematical model of the dynamics of the movement of the piston and the profiling of the piston skirt.

References

1. Danilov IK, Popova IM, Moiseev UI. Analysis and validation of the dynamic method for diagnosing

Sergei V. Smirnov, Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering of Engineering Academy of RUDN University, Candidate of Technical Sciences; smimov-sv@rudn.ru; eLIBRARY SPIN-code: 7133-5956, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8887-1745>.

Vladimir V. Kopylov, Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering of Engineering Academy of RUDN University, Candidate of Technical Sciences; eLIBRARY SPIN-code: 7535-8716.

Alexander R. Makarov, Professor at the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering of Engineering Academy of RUDN University, Candidate of Technical Sciences; eLIBRARY SPIN-code: 9195-4544, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6895-3076>.

Alexander A. Vorobyev, postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering of Engineering Academy of RUDN University; eLIBRARY SPIN-code: 1782-2846, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3977-9862>.

Kirill V. Shkarin, Assistant of Department of Mechanical and Instrument Engineering of Engineering Academy of RUDN University; eLIBRARY SPIN-code: 4599-9150.

diesel engine connecting rod bearings. *Transport Problems*. 2018;13(1):123–133.

2. Putintsev SV. *Mekhanicheskie poteri v porshnevnykh dvigatelyakh: spetsial'nye glavy konstruirovaniya, rascheta i ispytaniy* [Mechanical losses in piston engines: special chapters in the design, calculation and testing]. Moscow: MGTU imeni N.E. Bauman; 2011. (In Russ.)

3. Putintsev SV, Ageev AG. Proverka effektivnosti primeneniya reber zhestkosti yubki porshnya malorazmernogo dizelya [Efficiency checking of use of stiffening ribs for piston skirt of a low-sized diesel engine]. *Tractors and agricultural machinery*. 2016;11:35–39. (In Russ.)

4. Kim K. A Study of Friction and Lubrication Behavior for Gasoline Piston Skirt Profile Concepts. Part 3. *SAE Technical Paper*. 2009;(01-0193):1–5.

5. Doikin AA. *Raschetno-eksperimental'nyi metod profilirovaniya obrazuyushchei porshnya dlya povyshe-*

niya resursa tribosopryazheniya "porshen' – tsilindr" DVS [Calculation and experimental method for profiling a piston generatrix to increase the piston-cylinder tribo-conjugation resource] (PhD dissertation). Chelyabinsk; 2013. (In Russ.)

6. Abbas MT, Maspeyrot P, Dekkiche A, Benbrik M, Hacene FB. Elastohydrodynamic Piston Skirt Lubrication: Effect on Tribological Performances. *ASME/STLE International Joint Tribology Conference*. 2012. p. 237–242. DOI: 10.1115/IJTC2012-61129.

7. Zhenpeng H. Piston skirt friction loss and dynamic analyses based on FEM method. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2018;70(4):656–672.

8. Ageev AG. Zavisimost' dliny yubki porshnya ot skorostnogo rezhima raboty dvigatelya [The dependence of the piston skirt length on the high-speed engine]. *Molodezhnyi nauchno-tekhnicheskii vestnik MGTU imeni N.E. Baumana [Politechnical student journal of BMSTU]*. 2013;(2):6–10. (In Russ.)

9. Allmaier H, Sander DE, Reich FM. Measuring friction in automotive engines & determining the contributions of the individual subsystems. *World Tribology Congress*. Torino; 2013. p. 117.

10. Rahnejat H. *Tribology and dynamics of engine and powertrain: fundamentals, applications and future trends*. Elsevier; 2010.

11. Makarov AR, Smirnov SV, Osokin SV. Matematicheskoe modelirovanie dvizheniya porshnya v tsilindre [Mathematical modeling of piston movement in a cy-

linder]. *Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2014.;2(20):24–30. (In Russ.)

12. Kostrov AV, Smirnov SV, Makarov AR. Matematicheskoe modelirovanie dvizheniya porshnya v tsilindre v sloe smazochnogo materiala s uchetom deformatsii yubki [Mathematical modeling of dynamics movement of a piston skirt in the cylinder of the internal combustion engine]. *Dvigatestroenie*. 1990;(1):7–9 (In Russ.)

13. Smirnov SV, Makarov AR, Vorobyev AA. Matematicheskoe modelirovanie dinamiki dvizheniya yubki porshnya v tsilindre dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Mathematical modeling of dynamics movement of a piston skirt in the cylinder of the internal combustion engine]. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2017;18(3): 338–344. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-338-344. (In Russ.)

14. Mekheda VA. *Tenzometricheskii metod izmereniya deformatsii [Strain-gauge method deformation measurement]*: textbook. Samara: Samara State Aerospace University; 2011. (In Russ.)

For citation

Smirnov SV, Kopylov VV, Makarov AR, Vorobyev AA, Shkarin KV. An experimental study of the stress-strain state of the engine piston skirt on the engineless stand. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(4): 285–292. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-4-285-292>. (In Russ.)



DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-4-293-301

УДК 378:004

Научная статья

Сравнительный анализ программного обеспечения для изучения статистических методов контроля качества продукции

Р.В. Кожанов, Е.Р. Кожанова

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Российская Федерация, 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77

Л.А. Сорокина

АО «Пассажирское предприятие “Балаковская атомная станция”»,
Российская Федерация, 413866, Саратовская обл., г. Балаково-26

История статьи:

Поступила в редакцию: 21 октября 2019

Доработана: 25 ноября 2019

Принята к публикации: 29 ноября 2019

Ключевые слова:

качество продукции, статистические методы, статистические показатели, точечная диаграмма, программное обеспечение, нормальное распределение, гистограмма, контрольная карта Шухарта, диаграмма Парето

В статье рассматривается сравнительный анализ программного обеспечения (MS Excel, Mathcad и Matlab) для изучения статистических методов контроля качества продукции, необходимых для подготовки будущих специалистов в области качества продукции. Выбор определен наличием данного программного обеспечения в учебном заведении. Статистические методы контроля качества продукции являются обязательными элементами современных систем менеджмента качества, внедряемых на российских предприятиях, конкурентоспособность которых во многом зависит от умения персонала предприятия на практике применять эти методы на всех этапах жизненного цикла продукции. Анализ качества продукции начинают с построения гистограммы для выявления устранимого и неустраняемого брака и сравнения ее с кривой нормального распределения. Процесс формирования формы кривой нормального распределения можно проследить при построении контрольных карт на основе точечной диаграммы выборки. Следующим этапом является построение точечных диаграмм, на основании которых строятся контрольные карты (в нашем случае – контрольная карта Шухарта). Заключительным этапом в обучении является построение диаграмм Парето для выявления причин брака с ABC-анализом. Авторами проведен сравнительный анализ программных продуктов MS Excel, Mathcad и Matlab для реализации основных статистических методов контроля качества продукции. Для обучения предлагается выбрать MS Excel по причине наличия пакета «Анализ данных», бесплатных аналогов, широко применяемых на предприятиях, возможности хранения исходных данных и использования их в других программах (импорт данных).

Введение

Статистические методы контроля качества продукции, включающие в себя анализ и оценку,

Кожанов Роман Вячеславович, магистрант по направлению «Информатика и вычислительная техника» Института электронной техники и машиностроения СГТУ имени Гагарина Ю.А.; eLIBRARY SPIN-код: 8494-8269.

Кожанова Евгения Романовна, доцент кафедры электронных приборов и системотехники Института электронной техники и машиностроения СГТУ имени Гагарина Ю.А.; кандидат технических наук; ljubimzh@yandex.ru; eLIBRARY SPIN-код: 7696-4870, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7571-1283>.

Сорокина Любовь Александровна, экономист АО «Пассажирское предприятие “Балаковская атомная станция”», кандидат технических наук; eLIBRARY SPIN-код: 4392-7795.

© Кожанов Р.В., Кожанова Е.Р., Сорокина Л.А., 2019



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

являются обязательными элементами современных систем менеджмента качества [1], внедряемых на российских предприятиях, конкурентоспособность которых во многом зависит от умения персонала предприятия на практике применять эти методы на всех этапах жизненного цикла продукции. Умение персонала складывается из знаний и навыков использования информационных технологий, позволяющих повысить качество выпускаемой продукции.

В настоящее время для практической реализации статистических методов качества продукции используют не только специальные, напри-

мер Statistica, SPSS [2–5], но и другие программы – от электронных таблиц MS Excel [6] до математических пакетов Mathcad, Matlab Scilab и др. [7–9], включая их бесплатные аналоги. Количество доступных статистических функций последних сегодня почти не уступает специальным программам, поэтому задача подготовки специалистов для предприятий с умениями применять различные информационные технологии при решении задач контроля и мониторинга качества продукции, используя в том числе и статистические методы, является актуальной.

1. Постановка задачи

Рассмотрим применение информационных технологий для статистических методов анализа и оценки качества продукции на примере измерений партии обработанных деталей «Втулка Ø8,5H14» (рис. 1) [10].

При проведении измерений получаются случайные величины, появление которых предсказать невозможно, но они чаще всего подчиняются нор-

мальному закону распределения (закону Гаусса). Данный закон применяется во многих областях науки, в том числе и при анализе и оценке качества изделий, и является моделью для многих реальных процессов. Это объясняется тем, что он является *предельным законом*, к которому приближаются другие законы распределения и обладает *правилом трех сигм*, которое имеет большое практическое применение [2; 11].

Кривую нормального закона распределения называют *нормальной (гауссовой) кривой* (рис. 2) и характеризуют такими параметрами, как среднее арифметическое x_{cp} и среднеквадратическое отклонение (СКО) σ , которые определяют положение кривой относительно начал координат и ее форму. В качестве образца принимают кривую распределения с $x_{cp} = 0$ и $\sigma = 1$.

На практике нормальное распределение описывается четырьмя основными моментами: математическим ожиданием (МО), дисперсией, коэффициентом асимметрии As и коэффициентом эксцесса Ex (табл. 1) [11].

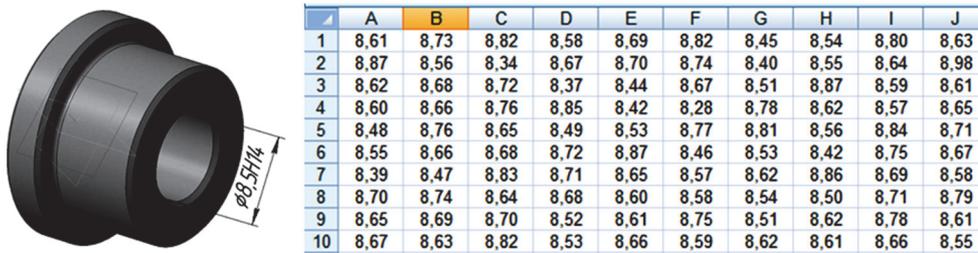


Рис. 1. Втулка Ø8,5H14 и выборка по внутреннему диаметру втулки [10]
[Figure 1. Sleeve Ø8,5H14 and a sample of the internal diameter of the sleeve [10]]

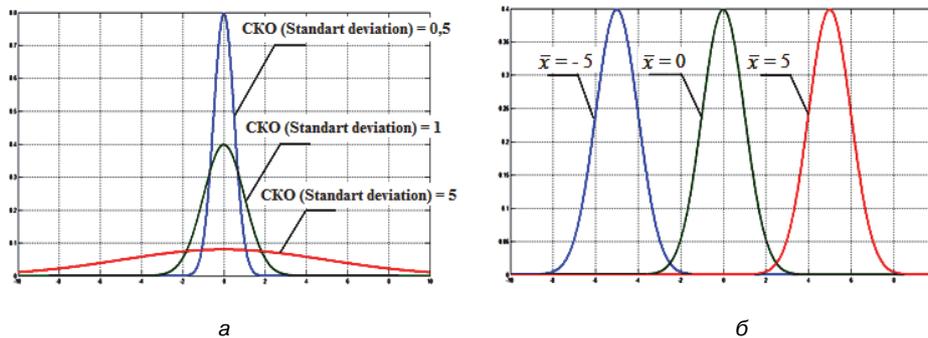


Рис. 2. Кривая нормального распределения с различными значениями СКО (а) и среднего арифметического x_{cp} (б) [11]
[Figure 2. The curve of the normal distribution with different values of the standard deviation (a) and arithmetic mean (б) [11]]

Геометрический смысл основных моментов нормального распределения
 [Table 1. Geometric meaning of the basic points of the normal distribution]

Обозначение [Designation]	Название момента [The name of the moment]	Геометрический смысл [Geometrical meaning]
μ_1	Математическое ожидание (среднее арифметическое x_{cp}) [Mathematical expectation (average x_{cp})]	Показывает расположение относительно начала координат [Shows the location relative to the origin]
μ_2	Дисперсия σ^2 [Variance σ^2]	Показывает разброс вокруг среднего x_{cp} [Shows the spread around the average x_{cp}]
μ_3	Коэффициент асимметрии As [Skewness As]	Характеризует асимметрию распределения [Characterizes the asymmetry of the distribution]
μ_4	Коэффициент эксцесса Ex [Kurtosis Ex]	Показывает асимметрию распределения [Characterizes the asymmetry of the distribution]

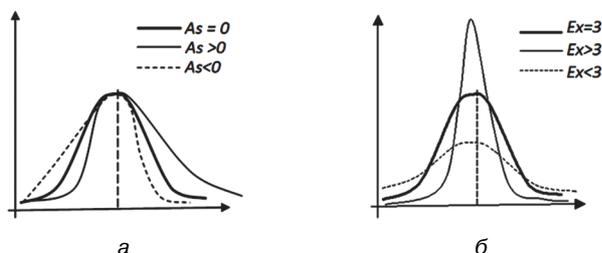


Рис. 3. Кривая нормального распределения с различными значениями коэффициента асимметрии As (а) и коэффициента эксцесса Ex (б)

[Figure 3. Normal distribution curve with different values symmetry coefficient As (a) and kurtosis Ex (б)]

2. Расчет статистических методов контроля качества продукции

Вычисление статистических показателей.

Программа вычисления статистических показателей в математическом пакете Matlab записывается в М-файл и состоит из специальных статистических функций (рис. 4). Исходные данные можно загружать из файла MS Excel – statistica.xls или текстового файла (txt), а также из рабочего окна программы [11].

```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

Среднее арифметическое (Average) = 8,639300
СКО (SКО) = 0,1311199
Дисперсия (Variance) = 0,0171924
Асимметрия (Asymmetry) = -0,1515558
Эксцесс (Kurtosis) = 0,0478902
Размах (Span) = 0,700000
Минимум (Minimum) = 8,2800000
Максимум (Maximum) = 8,9800000
Коэффициент вариации (Coefficient of variation) = 1,5177147
fx >>
    
```

Рис. 4. Результат расчета статистических показателей в Matlab [11]

[Figure 4. Result of calculation of statistical indicators in Matlab [11]]

В программе Mathcad исходные данные можно представить в виде текстового файла (txt) или фай-

ла MS Excel (xls). Часть статистических показателей можно вычислить с помощью специальных функций программы (например, среднее, дисперсия), а остальные придется вычислять самостоятельно [11].

Наиболее удобным для получения статистических показателей является пакет «Анализ данных – Описательная статистика» в MS Excel (рис. 5).

	A	B	C	D	E
4	8,6	Стандартная ошибка / Standard error		0,013111992	
5	8,48	Медиана / Median		8,645	
6	8,55	Мода / Mode		8,61	
7	8,39	Стандартное отклонение / Standard deviation		0,131119924	
8	8,7	Дисперсия выборки / The sample variance		0,017192434	
9	8,65	Эксцесс / Kurtosis		0,047890187	
10	8,67	Асимметричность / Asymmetry		-0,151555752	
11	8,73	Интервал / Interval		0,7	
12	8,56	Минимум / Minimum		8,28	
13	8,68	Максимум / Maximum		8,98	
14	8,66	Сумма / Sum		863,93	
15	8,76	Счет / Count		100	
16	8,66	Наибольший(1) / Most (1)		8,98	
17	8,47	Наименьший(1) / Least (1)		8,28	
18	8,74	Уровень надежности(95,0%) / Level of reliability		0,026017037	
19	8,69				

Рис. 5. Результат работы пакета «Анализ данных – Описательная статистика» в MS Excel [11]
 [Figure 5. The result of the package «Data Analysis – Descriptive Statistics» in MS Excel [11]]

В пакете «Анализ данных» для интерпретации результатов статистического анализа есть другие инструменты, например построение гистограмм и диаграмм Парето.

Построение точечных диаграмм. Процесс формирования формы кривой нормального распределения можно проследить при построении контрольных карт на основе точечной диаграммы выборки (рис. 6), которые используются для контроля качества изделий и анализа технологического процесса.

Результаты измерений по каждому образцу отмечают в контрольной карте отдельной точкой, отбирая, например, по 5 образцов через каждый

час или через 100 штук обработанных изделий, замеряя их, а результаты заносятся в карту. В результате можно получить следующие варианты распределения [10; 11]:

- 1 вариант – измеряемые детали не выходят за пределы поля допуска (рис. 7, а);
- 2 вариант – необходима перенастройка оборудования, так как распределение вышло за пределы поля допуска (рис. 7, б).
- 3 вариант – настройкой станка исправить положение невозможно, необходимо искать другие причины такого большого разброса размеров (рис. 7, в).

Построение карт Шухарта. Использование различных видов контрольных карт и их тщательный анализ ведут к лучшему пониманию и совершенствованию процессов [12–13].

Наиболее распространенной является контрольная карта Шухарта [12–14], представляющая собой визуальный инструмент – график изменения параметров процесса во времени, относительно среднего арифметического выборки, линий верхней и нижней границ (рис. 8). Контрольные карты Шухарта позволяют проанализировать технологический процесс, но выявить причины брака не могут.

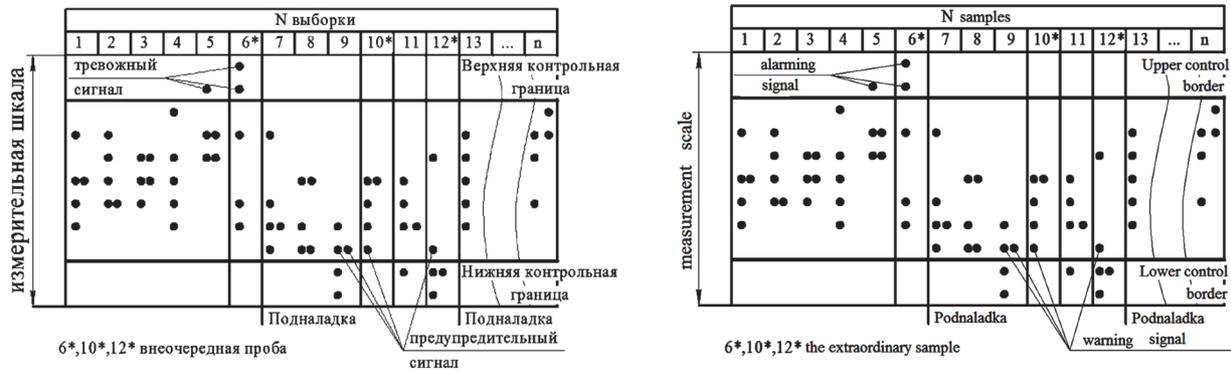


Рис. 6. Точечная диаграмма выборки [Figure 6. Scatter sampling]

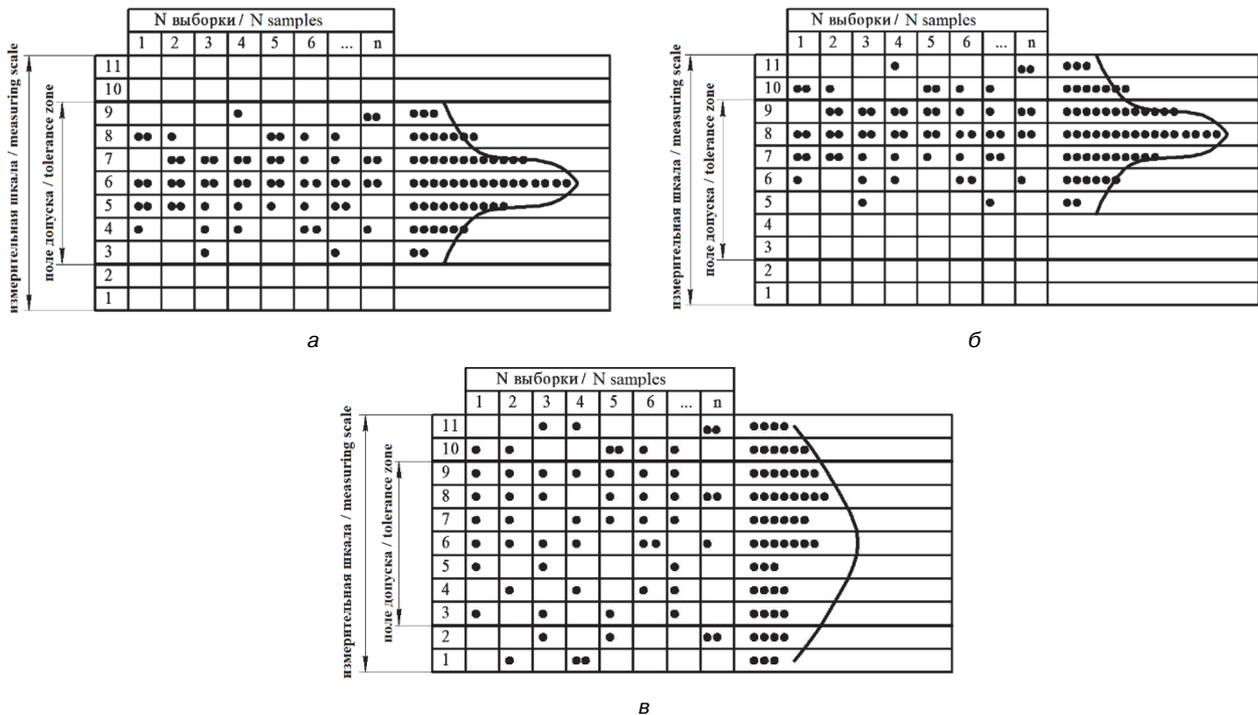


Рис. 7. Варианты контрольных карт [11] [Figure 7. Variants of control cards [11]]

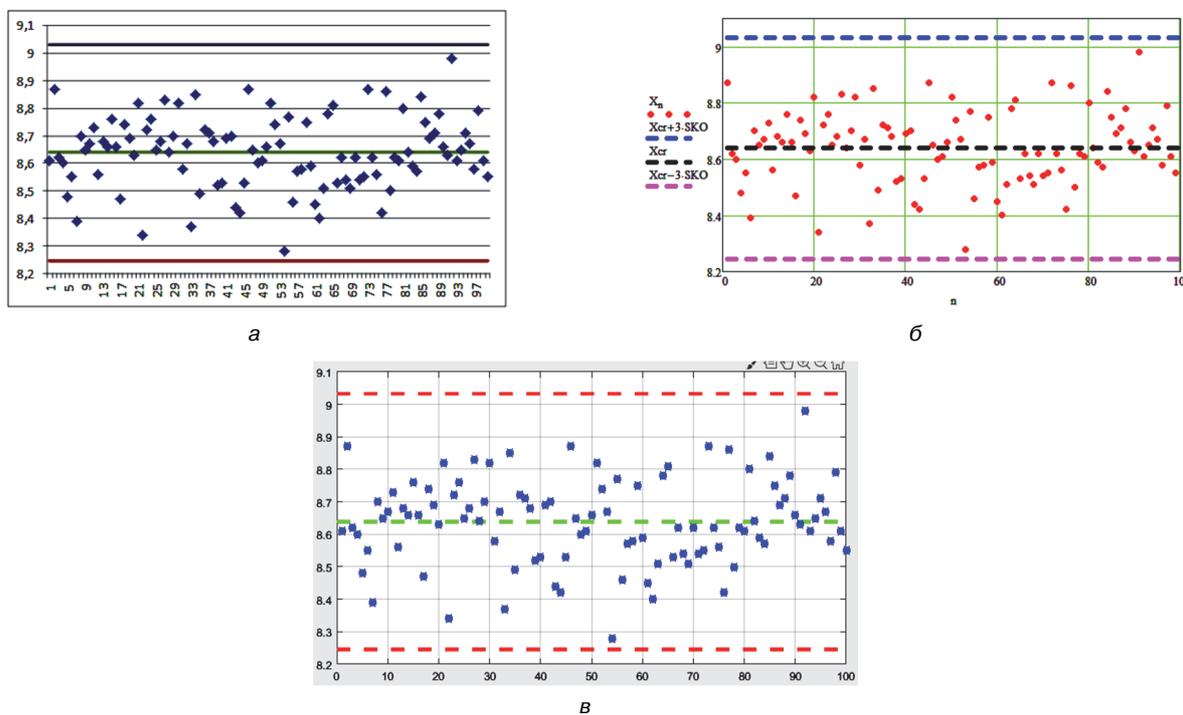


Рис. 8. Контрольные карты Шухарта: MS Excel (а), Mathcad (б) и Matlab (в) [14]
[Figure 8. Shewhart control charts: MS Excel (a), Mathcad (б) и Matlab (в) [14]]

Построение распределения экспериментальных данных. Построение распределения экспериментальных данных (чаще всего строится в виде гистограммы) и *кривой распределения случайной величины* (в виде линий) выполняется на одном графике. Для анализа данных применяется *правило трех сигм*, то есть значение непрерывной случайной величины попадает в интервал от -3σ до $+3\sigma$ с вероятностью 0,9973.

На рис. 9 видно, что все детали, лежащие левее нижней границы поля допуска, представляют собой исправимый брак, после повторной обработки их размер может попасть в пределы поля допуска.

Для построения распределения с кривой распределения случайной величины в программах Mathcad и Matlab требуются навыки программирования для создания программы расчета.

В MS Excel построение осуществляется при помощи пакета «Анализ данных» и функций. Например, при использовании статистической функции MS Excel можно рассчитать количество устранимого (14,14 %) и неустраняемого (9,54 %) брака [3]. Следовательно, количество годных деталей составляет 76,32 % [10].

Построение диаграммы Парето. Для выявления причин брака используются *график* или *диаграммы (гистограммы) Парето*. При использо-

вании диаграммы Парето для контроля определяющих факторов наиболее распространенным методом анализа является так называемый *ABC-анализ* [15]. Диаграмма Парето используется при выявлении наиболее значимых и существенных факторов, влияющих на возникновение несоответствий или брака, что дает возможность разработать стратегию действий, направленную на повышения качества продукции [15–16].

Построение диаграммы Парето начинают с классификации возникающих проблем по отдельным факторам (например, проблемы, относящиеся к браку; проблемы, относящиеся к работе оборудования или исполнителей, и т. д.) Затем следуют сбор и анализ статистического материала по каждому фактору, чтобы выяснить, какие из этих факторов являются преобладающими при решении проблем (рис. 10) [16].

Затем проводят *ABC-анализ* (рис. 11) по группам дефектов. К группе *A* можно отнести деформацию и отклонения в размерах (78 % от суммы потерь); царапины и раковины – к группе *B* и к группе *C* – все остальные дефекты.

Следует отметить, что в пакете «Анализ данных» MS Excel имеется инструмент для построения диаграмм Парето, а в программах Mathcad и Matlab для этого необходимо создать программу.

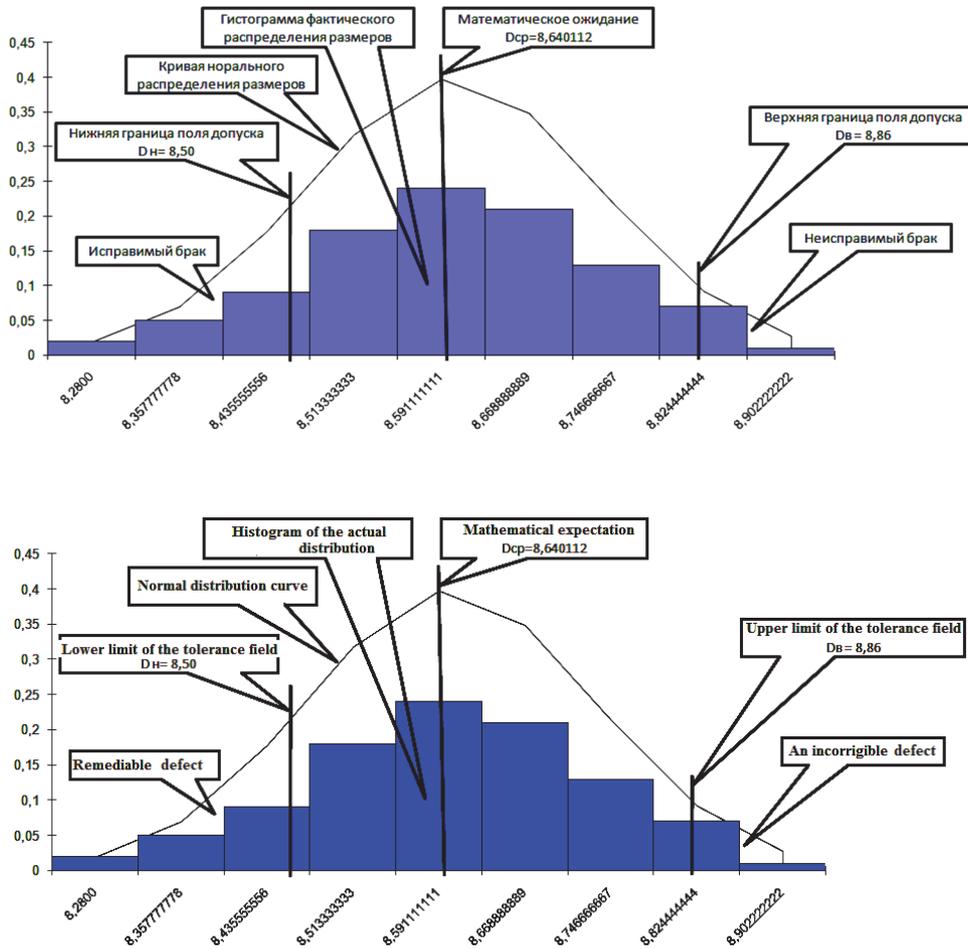


Рис. 9. Сравнение экспериментальных и расчетных данных [10]
[Figure 9. Comparison of experimental and calculated data [10]]

№	Типы дефектов (Type of defect)	Число дефектов (Number of defects)	Накопленная сумма числа дефектов (Accumulated sum of the number)	Процент числа дефектов по каждому признаку к общей сумме (Percentage of defects for each attribute to the total amount)	Накопленный процент (Accrued interest)
1	Деформация/Deformation	162	162	49	49
2	Отклонения в размерах/Deviations in size	48	210	14	63
3	Царапины/Scratches	29	239	9	72
4	Раковины/Shells	24	263	7	79
5	Трещины/Cracks	17	280	5	84
6	Пятна/Spots	13	293	4	88
7	Изгиб/Bend	11	304	3	91
8	Разрыв/Gap	4	308	1	92
9	Прочие/Other	25	333	8	100
11	Итого/	333		100	

Рис. 10. Информация по дефектам в MS Excel [6]
[Figure 10. Defect information in MS Excel [6]]

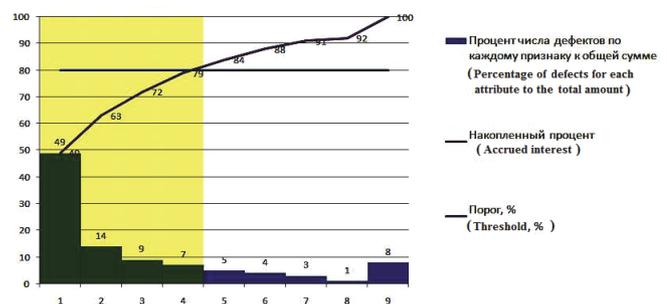


Рис. 11. Построение диаграммы Парето в MS Excel [16]
[Figure 11. Pareto Charting in MS Excel [16]]

Заключение

Предложено последовательное изучение основных статистических методов анализа и оценки качества продукции для подготовки будущих специалистов в области управления качеством в машиностроении, а именно:

- гистограмма распределения с вычислением статистических показателей;
- точечная диаграмма, на основании которой строятся контрольные карты;
- диаграмма Парето с ABC-анализом для выявления причин нарушения технологического процесса.

Таблица 2

**Сравнительный анализ программных продуктов
для реализации основных статистических методов анализа и оценки качества продукции**
[Table 2. Comparative analysis of software products
for the implementation of basic statistical methods of analysis and evaluation of product quality]

№	Критерий [Measure]	MS Excel	Mathcad	Matlab
1	Импорт файлов [Files import]	txt	txt и xls	txt и xls
2	Вычисление статистических показателей [Calculation of statistical indicators]	+ Пакет «Анализ данных» [Data Analysis package]	+ Есть функции [There are functions]	+ Есть функции [There are functions]
3	Построение распределения [Building a distribution]	+ Пакет «Анализ данных» [Data Analysis package]	+ Необходимы навыки работы [Work skills needed]	+ Необходимы навыки работы [Work skills needed]
4	Точечный график [Scatter plot]	+	+	+
5	Контрольная карта Шухарта [Shewhart control map]	+	+	+
6	Диаграмма Парето [Pareto chart]	+ Пакет «Анализ данных» [Data Analysis package]	+ Необходимы навыки работы [Work skills needed]	+ Необходимы навыки работы [Work skills needed]
7	Наличие бесплатных аналогов [Availability of free analogues]	+ <i>Calc OpenOffice, LibreOffice</i>	-	+ <i>Scilab</i>
8	Хранение исходных данных как база данных [Storing source data as a database]	+	-	-

В табл. 2 проведен сравнительный анализ программных продуктов MS Excel, Mathcad и Matlab для реализации основных статистических методов анализа и оценки качества продукции, на основе которого предлагается использовать для обучения MS Excel вследствие наличия пакета «Анализ данных», бесплатных аналогов, широко применяемых на предприятиях, возможности хранения исходных данных и использования их в других программах (импорт данных).

Список литературы

1. Гумеров А.Ф., Схиртладзе А.Г., Гречишников В.А., Жарин Д.Е., Юрасов С.Ю. Управление качеством в машиностроении: учеб. пособие. Старый Оскол: ТНТ, 2008. 168с.
2. Гореева Н.М., Демидова Л.Н. Статистика: учебник. Москва: Прометей, 2019. 496 с.
3. Мойзес Б.Б., Плотникова И.В., Редько Л.А. Статистические методы контроля качества и обработка экспериментальных данных: учебное пособие. Томск: ТПУ, 2016. 119 с.
4. Гинис Л.А. Статистические методы контроля и управления качеством. Прикладные программные сред-

ства: учебное пособие. Ростов н/Д – Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2017. 81 с.

5. Ryan T.P. Statistical methods for quality improvement. John Wiley & Sons, Inc., 2011. 704 p. DOI: 10.1002/9781118058114.

6. Цытин А.П., Фаизова Л.Р. Статистика в табличном редакторе Microsoft Excel: лабораторный практикум. Оренбург: Оренбургский государственный университет; ЭБС АСВ, 2016. 289 с.

7. Плецинская И.Е., Гитов А.Н., Бадертдинова Е.Р., Дуев С.И. Интерактивные системы Scilab, Matlab, Mathcad: учебное пособие. Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2014. 195 с.

8. Щетинин Ю.И. Анализ и обработка сигналов в среде MATLAB: учебное пособие. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2011. 115 с.

9. Воскобойников Ю.Е., Задорожный А.Ф., Литвинов Л.А., Черный Ю.Г. Решение инженерных задач в пакете Mathcad: учебное пособие. Новосибирск: Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин); ЭБС АСВ, 2013. 121 с.

10. Кирьянова Г.А., Сорокина Л.А., Кожанова Е.Р. Статистический анализ партии обработанных изделий в MS Excel // Молодой ученый. 2015. Т. 81. № 1. С. 71–73.

11. Кожанов Р.В., Артемова А.Д., Кельплер М.А., Гягяева А.Г., Сорокина Л.А., Кожанова Е.Р. Вычисление статистических показателей с использованием математического пакета Matlab // Молодой ученый. 2015. № 6. С. 175–181.

12. ISO 7870-1:2014. Control charts. Part 1: General guidelines.

13. ISO 7870-2:2013. Control charts. Part 2: Shewhart control charts.

14. Кожанов Р.В., Артемова А.Д., Гягяева А.Г., Сорокина Л.А., Кожанова Е.Р. Построение контрольных карт Шухарта с применением Mathcad и Matlab // Актуальные вопросы технических наук: материалы III Международной научной конференции. Пермь, 2015. С. 20–25.

15. Dunford R., Su Q., Tamang E. The Pareto Principle // *The Plymouth Student Scientist*. 2014. Vol. 7. No. 1. Pp. 140–148.

16. Кожанов Р.В., Гягяева А.Г., Кожанова Е.Р., Сорокина Л.А. Программа построения диаграммы Парето для оценки качества продукции // *Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование сборник научных трудов 3-й Международной молодежной научно-практической конференции*: в 2 т. 2016. Т. 1. С. 342–346.

Для цитирования

Кожанов Р.В., Кожанова Е.Р., Сорокина Л.А. Сравнительный анализ программного обеспечения для изучения статистических методов контроля качества продукции // *Вестник Российского университета дружбы народов*. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 4. С. 293–301. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-4-293-301>

Research paper

Comparative analysis of software for the study of statistical methods of control of product quality²

Roman V. Kozhanov, Evgeniya R. Kozhanova

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Polytechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation

Lyubov A. Sorokina

JSC “Passenger Enterprise ‘Balakovo Nuclear Power Plant’”, Balakovo-26, 413866, Saratov region, Russian Federation

Article history:

Received: October 21, 2019

Revised: November 25, 2019

Accepted: November 29, 2019

Keywords:

product quality, statistical methods, statistical indicators, scatter chart, software, normal distribution, histogram, Shewhart control map, Pareto chart

The article discusses the comparative analysis of software (MS Excel, Mathcad and Matlab) for the study of statistical methods of product quality control necessary for the training of future specialists in the field of product quality. The choice is determined by the presence of this software in the educational institution. Statistical methods of product quality control are mandatory elements of modern quality management systems implemented at Russian enterprises, the competitiveness of which largely depends on the ability of the company's personnel to apply these methods in practice at all stages of the product life cycle. The analysis of product quality begins with the construction of a histogram to identify avoidable and irremediable defects and compare it with the normal distribution curve. The process of forming the shape of the normal distribution curve can be traced in the construction of control maps based on a scatter plot of the sample. The next step is the construction of dot diagrams, on the basis of which control maps are built (in our case – the control map of Shewhart). The final step in training is the construction of Pareto diagrams to identify the causes of defects with ABC analysis. The authors conducted a comparative analysis of software products MS Excel, Mathcad and Matlab for the implementation of basic statistical methods of product quality control. For training it is proposed to choose MS Excel because of the availability of the Data Analysis package, free analogues that are widely used in enterprises, the ability to store the original data and use them in other programs (data import).

Roman V. Kozhanov, master student in Computer Science and Computer Engineering of Institute of Electronic Engineering and Mechanical Engineering of SSTU; eLIBRARY SPIN-code: 8494-8269.

Evgeniya R. Kozhanova, Assistant Professor of the Electronic Devices and Systems Engineering of Institute of Electrical and Mechanical Engineering of SSTU, Candidate of Technical Sciences; ljubimzh@yandex.ru; eLIBRARY SPIN-code: 7696-4870, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7571-1283>.

Lyubov A. Sorokina, Economist of JSC “Passenger Enterprise ‘Balakovo Nuclear Power Plant’”, Candidate of Technical Sciences; eLIBRARY SPIN-code: 4392-7795.

References

1. Gumerov AF, Skhirtladze AG, Grechishnikov VA, Zharin DE, Yurasov SYu. *Upravleniye kachestvom v mashinostroyenii [Quality management in mechanical engineering]*: textbook. Staryy Oskol: TNT Publ.; 2008. (In Russ.)
2. Gareeva NM, Demidova LN. *Statistika [Statistics]*: textbook. Moscow: Prometheus Publ.; 2019. (In Russ.)
3. Moises BB, Plotnikova IV, Redko LA. *Statisticheskie metody kontrolya kachestva i obrabotka eksperimental'nykh dannykh [Statistical methods of quality control and experimental data processing]*: textbook. Tomsk: TPU Publ.; 2016. (In Russ.)
4. Ginis LA. *Statisticheskie metody kontrolya i upravleniya kachestvom. Prikladnye programmnye sredstva [Statistical methods of quality control and management. Application software]*: textbook. Rostov-on-Don: Southern Federal University; 2017. (In Russ.)
5. Ryan TP. *Statistical methods for quality improvement*. John Wiley & Sons, Inc.; 2011. DOI: 10.1002/9781118058114.
6. Tsypin AP, Faizova LR. *Statistika v tablitsnom redaktore Microsoft Excel [Statistics in Microsoft Excel spreadsheet editor]*: laboratory workshop. Orenburg: Orenburg State University, EBS ASV Publ.; 2016. (In Russ.)
7. Pleshchinskaya IE, Gitov AN, Badertdinova ER, Duev SI. *Interaktivnye sistemy Scilab, Matlab, Mathcad [Interactive systems Scilab, Matlab, Mathcad]*: textbook. Kazan': Kazan National Research Technological University; 2014. (In Russ.)
8. Shchetinin YI. *Analiz i obrabotka signalov v srede Matlab [Analysis and signal processing in Matlab]*: textbook. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University; 2011. (In Russ.)
9. Voskoboynikov YE, Zadorozhny AF, Litvinov LA, Cherny YG. *Reshenie inzhenernykh zadach v pakete Mathcad [The solution of engineering problems in Mathcad]*: textbook. Novosibirsk: Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, EBS ASV Publ.; 2013. (In Russ.)
10. Kir'yanova GA, Sorokina LA, Kozhanova ER. *Statisticheskiy analiz partii obrabotannykh izdeliy v MS Excel [Statistical analysis of the batch of processed products in MS Excel]*. *Young Scientist*. 2015;81(1):71–73. (In Russ.)
11. Kozhanov RV, Artemova AD, Kel'pler MA, Gyagyayeva AG, Sorokina LA, Kozhanova ER. *Vychisleniye statisticheskikh pokazateley s ispol'zovaniyem matematicheskogo paketa Matlab [Computing statistics using the Matlab math package]*. *Young Scientist*. 2015;6:175–181. (In Russ.)
12. ISO 7870-1:2014. *Control charts. Part 1: General guidelines*.
13. ISO 7870-2:2013. *Control charts. Part 2: Shewhart control charts*.
14. Kozhanov RV, Artemova AD, Gyagyayeva AG, Sorokina LA, Kozhanova ER. *Postroyeniye kontrol'nykh kart Shukharta s primeneniym Mathcad i Matlab [Construction of Shuhart control charts using Mathcad and Matlab]*. *Actual problems of technical sciences: materials of III International scientific conference*. Perm; 2015. p. 20–25. (In Russ.)
15. Dunford R, Su Q, Tamang E. *The Pareto Principle*. *The Plymouth Student Scientist*. 2014;7(1):140–148.
16. Kozhanov RV, Gyagyayeva AG, Kozhanova ER, Sorokina LA. *Programma postroyeniya diagrammy Pareto dlya otsenki kachestva produktsii [Pareto Chart Building Program for Assessing Product Quality]*. *Proceedings of Product Quality: Monitoring, Management, Enhancement, Planning: Collection of Scientific Works of the 3rd International Youth Scientific-Practical Conference*. 2016;1:342–346. (In Russ.)

For citation

Kozhanov RV, Kozhanova ER, Sorokina LA. Comparative analysis of software for the study of statistical methods of control of product quality. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(4):293–301. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-4-293-301>. (In Russ.)



НАУКИ О ЗЕМЛЕ
EARTH SCIENCE

DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-4-302-307
UDC 628.16

Research paper

**Diagnosis, recommendations and optimization
for potable water treatment plant in Cauca (Colombia)**

Dustin Stephan Melendez Giraldo

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

Article history:

Received: October 21, 2019

Revised: November 27, 2019

Accepted: November 29, 2019

Keywords:

water supply, water treatment, physical, chemical and microbiological test, coagulation, flocculation, sedimentation, filtration, optimization

Currently the water supply system in the municipality of Corinto (Cauca) in Colombia provides drinking water to the entire urban and rural population of the municipality. In order to provide drinking water to the entire population, it became necessary to optimize and/or expand the existing water treatment plant. The article presents an assessment of the consideration of two optimization options: the need for reconstruction of existing water treatment facilities or the construction of additional water treatment units. A reasonable proposal was made to expand the station by building additional water treatment units, including advanced modern water treatment technologies, such as coagulation, flocculation, sedimentation, filtration, sorption, settling using thin-layer modules and disinfection, based on the survey (diagnostics), technical and economic analysis, analysis of the efficiency of the existing water treatment plant, taking into account the quality of drinking water preparation, confirmed by the analysis of samples, the results of physical, chemical and microbiological tests, indicating the optimal quality of drinking water for human consumption. The use of modern water treatment technologies will allow to achieve the required quality of purified sufficient water for drinking purpose.

Introduction

In the municipality of Corinto (Cauca) in Colombia, it became necessary to implement alternatives to improve water for human consumption, to develop different operations and processes that allow the purification of raw water, ensuring priority welfare of the population, all this in order to reduce the spread of diseases transmitted by untreated water.

The focus of this document is to design several optimizations for Corinto municipality potable water treatment plant in Cauca, Colombia through the diagnosis of the processes and operations carried out in the plant and optimization alternatives [1; 2]. Using either the current hydraulic configuration of units or designing new units as a basis for the improvement of the old one, to increase the coverage of treated water for the future generations [3].

The PWTP current units design will be completing in 2020, therefore, it is necessary to conduct a study of current state and to generate an optimal alternative to increase the facilities of hydraulic capacity.

Dustin Stephan Melendez Giraldo, civil engineer, master student of Department of Civil Engineering of Academy of Engineering of RUDN University; 1032175857@rudn.ru; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3592-3457>.

© Melendez Giraldo D.S., 2019



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

1. Methodology

Diagnosis. To execute the proposal, it is necessary to make a diagnosis of the PWTP current state, characterizing the catchment points, and identifying the treatment operations, by verify that the design parameters of each process are between the ranges established by the RAS2000 – Title C (Colombia’s regulation) and determine the physical-chemical and microbiological characteristics of the treated water [4].

This would allow to recommend the best alternative for the Corinto’s PWTP optimization. Below are the activities that were developed in the diagnosis:

- Activity 1: PWTP exploration.
- Activity 2: Technical information analysis.
- Activity 3: Check design parameters of the treatment processes.
- Activity 4: Samples collection.
- Activity 5: Physical-chemical and microbiological water parameters tests.

The purpose of each activity:

Activity 1, to identify the treatment units, and report about operation and construction materials.

Activity 2, a detailed analysis of each treatment process that was carried out in the PWTP, with the dimensions of the units, which were the product of measurements made in the first activity and a plan provided by EMCORINTO E.S.P.

Activity 3, to verify the design parameters of each existing treatment process (rapid mix, slow mix, sedimentation and filtration) among the ranges established by the RAS 2000 – Title C.

Activity 4, to explain the method used to collect water samples.

Activity 5, to show the physical-chemical and microbiological parameters of raw, sedimented and treated water.

Optimization alternative. At the end of the PWTP diagnosis, an alternative to be developed for the plant optimization, however before, it should be verified which units could work, with the designed flow rate.

The activities that developed in this stage are as following:

- Activity 6: Identify the critical points in the existing treatment units.
- Activity 7: Verify the hydraulic capacity of the current PWTP designs.
- Activity 8: Elaboration of the design alternative.

In summary, what has done in each activity:

Activity 6, the different problems in the diagnosis should be identified, emphasizing each one of

them and what consequences they could cause to the water treatment.

Activity 7, with the required flow designed for the rural and urban population, should be proceeded to verify that the operation of the units is optimal for the treatment.

Activity 8, the design alternative should be presented for the units that cannot treat the designed flow.

Designing of alternative budget and general recommendations. Once the design alternative was chosen, an approximate budget of the changes and additions proposed in the design alternative should be done, and recommendations for the optimization of the PWTP also should be developed.

2. Procedure and results analysis

Diagnosis. The Corinto’s aqueduct system has two bottom water intakes, one intake on *La Paila* river and another one on *El Chicharronal* stream, as well as four grit chamber tanks, three on *La Paila* catchment and one on *El Chicharronal* catchment. After the water is captured by this system, it is conducted to the PWTP, which is of a conventional type. It is also composed of an arrival chamber, gauging station, rapid mixing (rectangular spillway), horizontal hydraulic flocculator, conventional sedimentation tank with parallel plates, rapid sand filter, chlorine dosing. Finally, the water is stored in three tanks, the first one with a storage capacity of 600 m³, the second one with the capacity of 800 m³ (both tanks half-buried) and the last one is an elevated tank with the capacity of 10 m³.

The PWTP treatment process is shown in Figure 1.

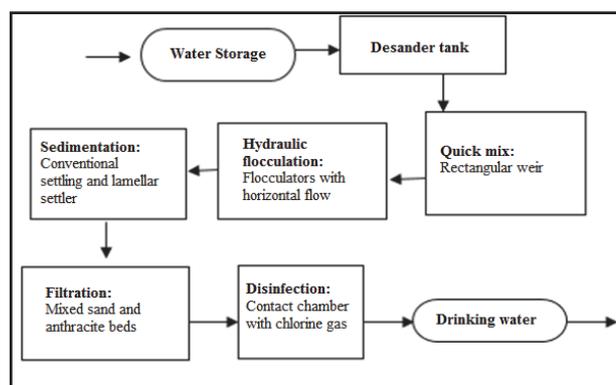


Figure 1. Plant processes treatment

After the current dimensions registration by EMCORINTO E.S.P., the PWTP hydraulic behavior was calculated.

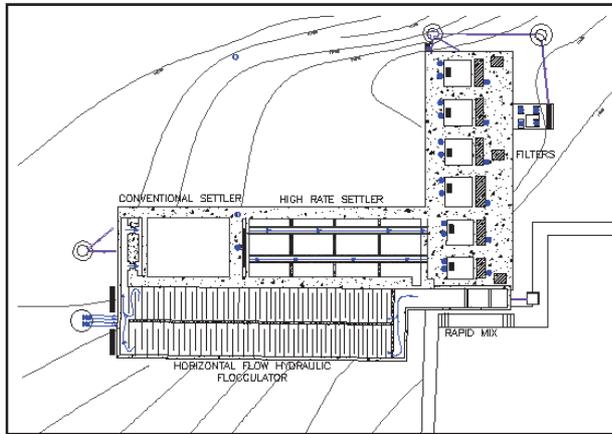


Figure 2. Existing treatment plant

The results on the design parameters of each process were the following.

Rapid mixing: analysis shows that the turbulence generated by the hydraulic shoulder is sufficient to produce an intermix between aluminum sulphate solution and water mass, since its hydraulic gradient is between the range of 1000 and 3000 s⁻¹ [5; 6].

Slow mixing: the flocculation tanks are composed of horizontal screens, in these three different speeds for each unit were obtained, which is very common in flocculators divided by different gradients – the objective is to start the canal path with a high speed, but not higher than 0.60 m/s and finish with a low speed, but not lower than 0.10 m/s.

Sedimentation: the surface charge conventional settler is too high (294 m/day), this is due to the lack of surface area, for this reason the speed v resulting between the sedimentation theoretical decomposition velocity v_0 and the horizontal drag velocity produced by the fluid v_f will be very high and some particles will not reach sedimentation [7–9].

Filtration: in relation to the filtration process, it was obtained that the entire battery works with a surface load of 333 m³/day, besides, its filtration capacity is high, and its filtering medium is mixed its works with anthracite and sand.

Regarding the physical-chemical and microbiological tests, the plant demonstrated to deliver the municipality with water of excellent quality, since it meets all the parameters required by Resolution 2115 of 2007 (Colombian regulation).

It is clearly seen that the water at the exit of the filters is already suitable for human consumption.

Then the design flow rate is determined with the calculated population, as well as the hydraulic parameters of the units, to verify that these can treat the required flow rate for the future population.

Table 1

Water analysis					
Sample	Turbidity (NTU)	pH	Color (UPC)	Temperature (°C)	Hour
PWTP Entry	488	7,62	190	21,9	00:00 h
	373	7,65	177	21	06:00 h
	274	7,6	127	23,7	12:00 h
Outlet of the conventional settler	44,7	–	–	–	00:00 h
	37,7	–	–	–	06:00 h
	33,9	–	–	–	12:00 h
Outlet of the lamellar settler	8,12	6,89	4	20,6	00:00 h
	8,69	6,91	4	20,3	06:00 h
	10,3	6,8	5	22,7	12:00 h
Output of the filters	0,96	6,8	0	20,9	00:00 h
	1,07	6,83	0	20,4	06:00 h
	1,15	6,79	0	22,6	12:00 h

Table 2

Population projection, design flow rate						
Year	Population	Net endowment (L/Hab/day)	Gross endowment (L/Hab/day)	Average daily flow rate (L/s)	Maximum daily flow rate (L/s)	Design flow rate (L/s)
2019	27 170	125	167	52	63	64
2024	28 956	125	167	56	67	69
2029	30 905	125	167	60	72	73
2034	33 052	125	167	64	77	78
2039	35 451	125	167	68	82	84
2044	38 179	125	167	74	88	91

Table 3

Hydraulic capacity for design flow rate (91 L/s)				
Rapid mixing: Thin-walled rectangular weir				
Parameters	Rank	Result	Fulfill	Fail
Froude number	4,0–9,0	4,055	X	
Mix time	< 1s	0,675 s	X	
Velocity gradient	1000s ⁻¹ –2000s ⁻¹	1482 s ⁻¹	X	
Slow mixing: Flocculator				
Mix time	10–15 min	8,46		X
Sedimentation: Lamellar settler				
Surface charge	120–300 m ³ /m ² /day	240 m/day		X
Filtration: High rate filters				
Surface charge	235–350 m ³ /m ² /day	550 m/day		X

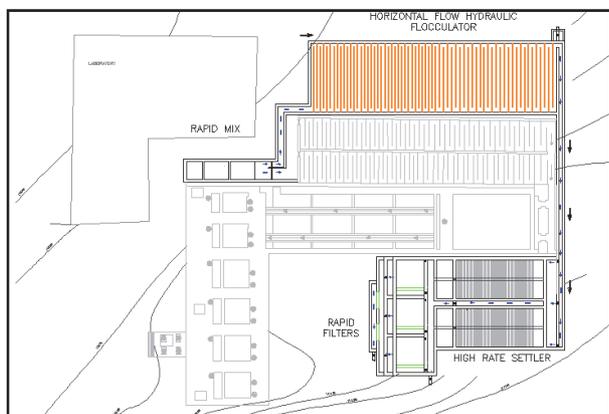


Figure 3. Projected treatment plant

In accordance with the previous points, it is necessary to design new units for the flow that cannot treat existing units, in addition the PWTP in general is working well and it would not be appropriate to alter its operation by modifying the existing units, so the following alternative was proposed (Figure 3).

Flocculation: The option of mechanical flocculators was not considered enough due to the low usual source turbidity and the high cost owing to the electrical energy they need for their operation. On the other hand, there are no topographical restrictions that do not allow a new flocculator structure next to the other two existing units. The previous one chooses by a flocculator hydraulics of horizontal flow, divided in two sections [10–12].

The designed flocculator is rectangular type with 15.22 m length \times 4.30 m width and 1.30 m depth, guaranteeing a detention period of 21 minutes for a flow of 36 l/s. The total flocculation time is 21 minutes – therefore, each section will retain the flow for 10.5 minutes.

Sedimentation: A high rate settler with laminar flow rate was adopted, with a decanter composed of two compartments, each with 2.40 m width \times 5.40 m length and 4.26 m depth.

The compartments are separated by a rectangular canal of 0.30 m width \times 0.25 m height.

The zone of plates of the settler has a length of 5.40 m, formed by fibrocement plates of 2.40 m \times 1.20 m and 8 mm thickness, inclined at 60° with respect to the horizontal, in addition to free spacing of 5 cm.

Filtration: It is a high rate system filtration, with sand and anthracite double filtering media. The cleaning of the filters is done by self-cleaning.

The filter battery is composed of 3 filters with compartment of 1.75 m width, 1.70 m length and

3.65 m total depth. A net filtration area of 3.0 m² per unit is available in this form.

The direct costs are approximate according to the catalogs, so once all the designs have been made: hydraulic, structural and foundation, it is recommended to redo the project budget.

Approximate direct cost of the design

Table 4

1. Preliminary works	918 USD
2. Earth works	13 300 USD
3. Structural works	35 424 USD
4. Installation of pipes and accessories	2 105 USD
5. Sedimentation system	918 USD
6. Filtration system	1 506 USD
7. Equipment and accessories for flow control	9 358 USD

It was determined that the approximate direct cost of the design is 66 935.33 USD [13].

3. Recommendations

The following alternative is presented since author’s point of view like the most optimum one, given the topographical, structural and operational conditions of the project. In this paper a hydraulic and operative optimization of the plant is assumed, it is recommended to adjust the budget, in case of carrying out the proposed improvement alternative, considering structural and foundation designs [14–16].

Conclusion

The results obtained in the physical-chemical and microbiological tests show that the water quality is optimal for human consumption, at the same time, it justifies that the existing water treatment units can continue to operate under the current conditions.

The alternative, that was developed throughout the project, promises to be the most viable, since its operation will not affect the operation of existing units.

All the processes of drinking water treatment, such as rapid mix, slow mix, sedimentation and filtration, require more research in terms of design and operation, that’s why it is necessary to have all the required designs for its optimization.

The budget for the design alternative, does not take into account the costs of structural designs or foundation, so the result is an approximate value.

References

1. Valencia JA. *Teoria y practica de la purificación del agua*. Bogota D.C.: NOMOS S.A.; 2000. vol. I.
2. Valencia JA. *Teoria y practica de la purificación del agua*. Bogota D.C.: NOMOS S.A.; 2000. vol. II.
3. Villegas de Brigard MP. *Purificación de aguas*. Bogotá: Segunda; 2007.
4. Ministerio de desarrollo económico, dirección de agua potable y saneamiento basico. *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS – 2000. Sección II. Título C. Sistemas de potabilización*. Available from: <http://www.minambiente.gov.co/documentos/TituloC.PDF>
5. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. 2013. Available from: <https://es.scribd.com/document/347030348/MODULO-CURSO-DISENO-DE-PLANTAS-POTABILIZADORAS-II-2013-pdf>
6. Romero JA. *Potabilización. Diseño De Sistemas De Purificación De Aguas*. Tercera edición. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería; 1999.
7. Canepa de Vargas L. *Tratamiento de aguas para el consumo humano: plantas de filtración rápida. Manual III: evaluación de plantas de tecnología apropiada*. Available from: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/014991/014991-04.pdf>
8. Canepa de Vargas L. *Tratamiento de aguas para el consumo humano: plantas de filtración rápida. Manual II: evaluación de plantas de tecnología apropiada*. Available from: http://www.bvsde.paho.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/m%20anualII/tomoI/ma1_tomo1_cap3.
9. Bernal SM. *Propuesta para el mejoramiento de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Bituima, Cundinamarca*. Bogota D.C.: Universidad de la Salle; 2011.
10. Bolivar JH. *Diagnostico y Optimizacion de la Planta de Tratamiento de Agua Potable, Municipio Puente Nacional*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander; 2005.
11. Clavijo A. *Evaluacion de la planta de tratamintode agua potable del municio de Garzón-Huila*. Bogota D.C.: Universidad Militar Nueva Granada; 2013.
12. Corinto AM. *Plan de Desarrollo del Municipio de Corinto*. 2011. Available from: http://www.corinto-cauca.gov.co/apc-afiles/35333035383764393835343462/Plan_de_Desarrollo_2008_UltimaVersion.pdf
13. *Sweets constructions catalogs, Product Catalogs for Building Products*. Available from: <https://sweets.construction.com/QuickLinks/productcatalogs>
14. Esp E. *Empresa de acueducto alcantarillado y aseo*. 2016. Available from: <http://www.emcorinto.com.co/html/acueducto.html> (accessed: 22 November 2016).
15. Muñoz DM. *Estado de la PTAP de Corinto, Cauca*. 15 July 2016. (D.S. Giraldo, Entrevistador.)
16. Ministerio de la protección social, ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. *Resolución número 2115 de 2007*. República de Colombia.

For citation

Melendez Giraldo DS. Diagnosis, recommendations and optimization for potable water treatment plant in Cauca (Colombia). *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(4):302–307. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-4-302-307>

Научная статья

Диагностика, рекомендации и оптимизация станции очистки питьевой воды в Кауке (Колумбия)

Д.С. Мелендес Хиральдо

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

История статьи:

Поступила в редакцию: 21 октября 2019

Доработана: 27 ноября 2019

Принята к публикации: 29 ноября 2019

Ключевые слова:

очистка воды, физико-химические характеристики, микробиологические характеристики, коагуляция, флокуляция, фильтрация, сорбция, седиментация, аквэдук, оптимизация

В настоящее время система водоснабжения в муниципалитете Коринто (Каука) в Колумбии обеспечивает питьевой водой полностью городское и часть сельского населения муниципалитета. С целью обеспечения питьевой водой всего населения (городского и сельского) возникла необходимость в оптимизации и/или расширении существующей станции водоподготовки. В статье представлена оценка рассмотрения двух вариантов оптимизации: реконструкции существующего сооружения водоподготовки или строительства дополнительных блоков водоподготовки. На основании проведенного обследования (диагностики), технико-экономического анализа, анализа эффективности работы действующей станции водоподготовки, с учетом качества под-

готовки воды питьевого качества, подтверждаемого анализом проб, результатами физико-химических и микробиологических исследований, свидетельствующих об оптимальном качестве питьевой воды для потребления человеком, предложено обоснованное решение о расширении станции путем строительства дополнительных блоков водоподготовки, включающих передовые современные технологии водоподготовки, такие как коагуляция, флокуляция, фильтрация, сорбция, отстаивание с применением тонкослойных модулей и обеззараживание. Применение современных технологий водоподготовки позволит добиться необходимого качества очищенной воды для потребления ее человеком в питьевых целях и в достаточных объемах.

Для цитирования

Melendez Giraldo D.S. Diagnosis, recommendations and optimization for potable water treatment plant in Cauca (Colombia) (Диагностика, рекомендации и оптимизация станции очистки питьевой воды в Кауке (Колумбия)) // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 4. С. 302–307. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-4-302-307>



DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-4-308-315

УДК 621.97.06

Научная статья

Определение допустимых параметров дефектов в базовых деталях кузнечно-прессовых машин

А.В. Корнилова

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

Чжо Зяяр

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Российская Федерация, 127055, Москва, Вадковский пер., 1

История статьи:

Поступила в редакцию: 31 октября 2019

Доработана: 25 ноября 2019

Принята к публикации: 29 ноября 2019

Ключевые слова:

кузнечно-прессовое оборудование, кривошипный пресс, эллиптическая трещина, допустимый параметр дефекта, пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений

В Советском Союзе была создана уникальная в мировом масштабе отрасль по серийному производству кузнечно-прессового оборудования. В настоящее время даже отслужившие свой проектный ресурс машины находятся в рабочем или в ремонтпригодном состоянии. Это привело к тому, что сейчас существует большой рынок вторичной продажи таких машин, в том числе в страны Юго-Восточной Азии и в Индию. Однако при вторичной продаже подобного оборудования в базовых деталях накапливается некая неизбежная повреждаемость. Кроме того, первые экземпляры моделей, выставленные на вторичную продажу, выпускались в период, когда методы неразрушающего контроля были не развиты. Часть дефектов могла оказаться необнаруженной. При покупке машины производят демонтаж, транспортировку, монтаж и испытания. Зафиксированы случаи, когда при монтаже и испытаниях в базовых деталях страгивались дефекты, что затрудняло или делало невозможным использование оборудования. Иногда на оборудовании такого типа (при модернизации) пытаются произвести технологические операции, требующие большей силы, чем ранее декларируемые. По этой причине при покупке/продаже (или модернизации) необходимо составлять карты допустимых дефектов, которые при наложении на карты обнаруженных дефектов позволят отбраковать/определить остаточный ресурс/ограничить технологическую силу кривошипной машины таким образом, чтобы дефекты при дальнейшей эксплуатации не стронулись и не привели к аварийной ситуации. Методика определения допустимых параметров подповерхностных эллиптических трещин показана на примере станины пресса КД2130 Барнаульского завода механических прессов.

Введение

Объектом исследования является пресс КД2130 (однокривошипный простого действия открытый

ненаклоняемый) силой 100 т (1 МН), предназначенный для вырубки, гибки, неглубокой вытяжки и других холодно-штамповочных работ. Такие прессы производят ПАО «Кувандыкский завод кузнечно-прессового оборудования “Долина”», Орский станкостроительный завод, Воронежский завод КПО имени М.И. Калинина. Первым начал выпускать эти прессы (базовая модель КД2130) Барнаульский завод механических прессов, сейчас он перешел на две модификации кривошипных листоштамповочных прессов силой 1 МН –

Корнилова Анна Владимировна, профессор департамента строительства Инженерной академии РУДН, доктор технических наук; Kornilova_av@rudn.ru; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5569-9320>, eLIBRARY SPIN-код: 6569-6240, Author ID: 351426, Researcher ID: U-3353-2017, Scopus Author ID: 7004499009.
Чжо Зяяр, аспирант кафедры композиционных материалов МГТУ «СТАНКИН»; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0131-1399>, Scopus Author ID: 56416430100.

© Корнилова А.В., Чжо Зяяр, 2019



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

серия К (пресс К2130В) и серия КЕ (пресс КЕ1430) с подвижным столом. Базовая модификация КД2130 была выбрана для исследования, потому что она выпускается уже более 35 лет (рис. 1). Производителями продано более 1000 экземпляров. Она активно продается (в том числе на рынке вторичной продажи оборудования) в страны Юго-Восточной Азии (включая Мьянму) и в Индию. Вопросами долговечности металлургического оборудования (среди которого оборудование для обработки металлов давлением) занимался отдел прочности ВНИИметмаш [1; 2].

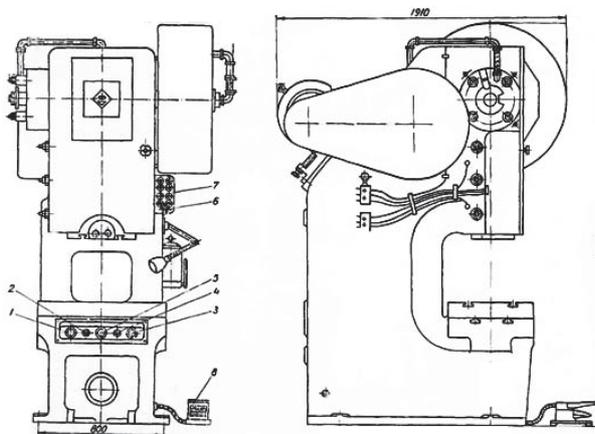


Рис. 1. Внешний вид пресса КД2130 (сборка)
[Figure 1. Appearance of the press KD2130 (assembly)]

1. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния станины пресса КД2130

Различным факторам, влияющим на долговечность кузнечно-прессового оборудования, посвящены работы [3–5], анализ которых позволил выявить, что превалирующим фактором является уровень напряжений, возникающих в деталях машины при приложении технологической нагрузки. Поэтому первым этапом анализа будет определение напряженно-деформированного состояния станины исследуемого пресса. Принятые в расчете механические характеристики – модуль упругости первого рода чугуна СЧ25 $1,4 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона 0,23, удельный вес $7,85 \cdot 10^{-5}$ Н/мм³. Технологическая сила прикладывалась на те элементы подштамповой плиты, которые находятся под нижней плитой штампового блока для типовой технологической операции (вырубка с максимальной силой, равной номинальной силе пресса). Симметричность конструкции

позволяла проводить расчет лишь ее половины. В качестве одной из подконструкций модели был взят вал, на который прикладывалась сила, противоположная силе технологической операции. Также были приложены ограничения на узлы, находящиеся в месте прохождения анкерных болтов. Результаты расчета сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния станы пресса силой 1 МН (базовая модель) в программном комплексе BASYS

[Table 1. Results of calculating the stress-strain state of a press mill with a force of 1 MN (basic model) in the BASYS software package]

Определяемая величина [Determined value]	Максимальное значение [Maximum value]	Минимальное значение [Minimum value]
Перемещение по оси X, мм [X axis movement, mm]	0,2	0,01
Перемещение по оси Y, мм [Y axis movement, mm]	0,4	0,02
Перемещение по оси Z, мм [Z axis movement, mm]	0,3	0,1
Напряжение по оси X, МПа [X axis stress, MPa]	28,2	10,3
Напряжение по оси Y, МПа [Y axis stress, MPa]	44,4	24,8
Напряжение по оси Z, МПа [Z axis stress, MPa]	33,7	25,4
Первое главное напряжение, МПа [First major stress, MPa]	57,4	7,3
Второе главное напряжение, МПа [Second main stress, MPa]	26,5	4,5
Третье главное напряжение, МПа [Third main stress, MPa]	16,9	3,1
Эквивалентные напряжения, МПа [Equivalent stress, MPa]	51,0	0,03

2. Проверка адекватности расчетных значений реальному напряженно-деформированному состоянию станины пресса КД2130

Адекватность расчетных результатов реальному напряженно-деформированному состоянию станины была проверена путем сравнения собственных расчетных данных, эксперимента из работы [2] и расчета из [6], проведенного в другом расчетном комплексе (SolidWorks). В работе [2] описан эксперимент по определению напряжений (по вертикальной оси) в станине пресса КД2130 (базовая модель Барнаульского завода механических прессов, выпуска 1985 года) с помощью тензодатчиков. Схема наклейки тензодатчиков показана на рис. 2.

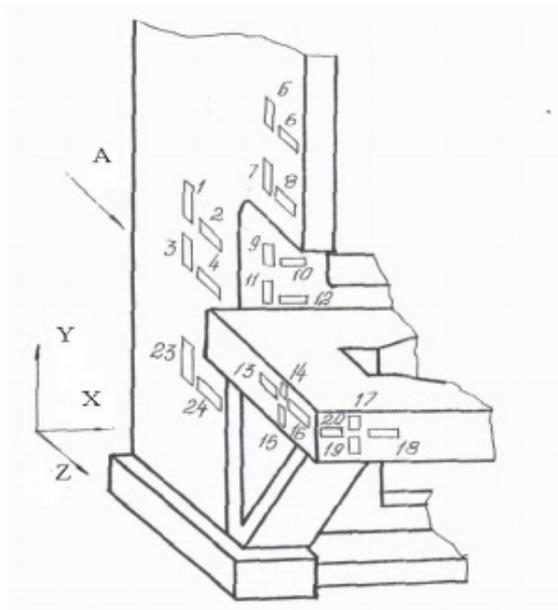


Рис. 2. Схема наклейки тензодатчиков [2]
[Figure 2. Load cell sticker diagram [2]]

В табл. 2 сведены экспериментальные величины из [2], полученные расчетом в [3] и вновь полученные данные.

Таблица 2

Сравнение расчетных и экспериментальных данных
[Table 2. Comparison of calculated and experimental data]

Номера датчиков (рабочий – компенсационный) [Numbers of sensors (working-compensation)]	Эксперимент [2] [Experiment [2]]	Расчет [6] [Calculation [6]]	Новые данные [New data]
1–2	4,0	2,9	3,9
3–4	0,0	3,0	1,0
5–6	4,0	4,2	3,2
7–8	4,0	4,3	4,1
9–10	50,0	33,0	45,0
11–12	44,0	40,4	40,4
13–14	0,0	0,7	0,2
15–16	4,0	3,9	3,2
17–18	0,0	1,1	0,6
19–20	4,0	3,6	3,8
21–22	8,0	9,5	9,9
23–24	12,0	11,0	10,6

Средняя абсолютная погрешность с экспериментом 1,31 МПа, с расчетом [6] в программе SolidWorks 1,57 МПа, что позволяет признать полученные в данные адекватными реальному напряженно-деформированному состоянию станины и использовать методы механики разрушения. Применению механики разрушения к различным видам оборудования посвящены работы [7–9].

3. Определение допустимых параметров подповерхностных эллиптических трещин

Схема подповерхностной эллиптической трещины показана на рис. 3. Коэффициент интенсивности напряжений, согласно [10]:

$$K_I = \frac{1,79 - 0,66 \frac{l}{c}}{\left[1 - F \left(\frac{l}{b}\right)^{1,8}\right]^{0,54}} \sigma^* \sqrt{l}. \quad (1)$$

В точке А:

$$F = 1 - 0,4 \frac{l}{c} - \left(0,5 - \frac{b}{t}\right)^2;$$

$$\sigma^* = \frac{1}{2}(\sigma_A + \sigma_B) + \frac{1}{30} \frac{1}{c} (4\sigma_A - 3\sigma_B - \sigma_D).$$

В точке D:

$$F = 1 - 0,4 \frac{l}{c} - 0,8 \left(0,5 - \frac{b}{t}\right)^{0,4};$$

$$\sigma^* = \frac{1}{2}(\sigma_D + \sigma_B) + \frac{1}{30} \frac{l}{c} (4\sigma_D - 3\sigma_B - \sigma_A).$$

Выражение (1) справедливо только при выполнении условия $l \leq 0,9b$ и $l \leq 0,5t$. Для выявления допустимых параметров эллиптических трещин был использован симплекс-метод, реализованный в оптимизационной надстройке Solver Microsoft Excel. Принималось, что допустимыми параметрами будет обладать дефект, у которого при приложении номинальной силы значение коэффициента интенсивности напряжений вблизи вершины дефекта будет меньше или равно K_{th} (порогового значения) – условие не страгивания дефекта, которое для коэффициента асимметрии цикла 0 (пульсирующий цикл) определяется, согласно [4], следующим образом:

$$K_{th} = 12,7 - 6 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_{0,2}, \quad (2)$$

где $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести материала, МПа.

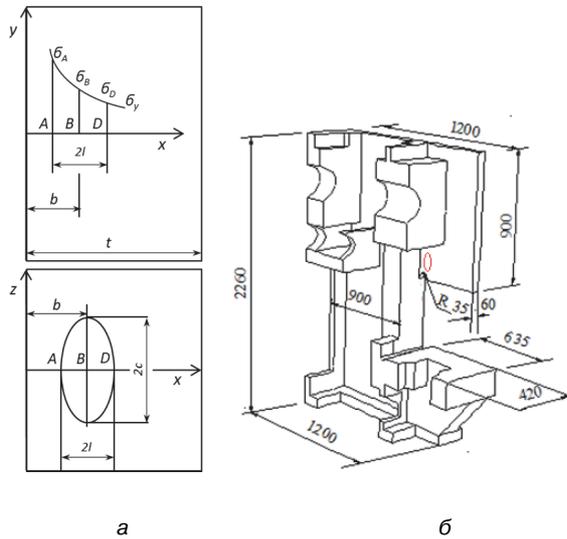


Рис. 3. Схема подповерхностной эллиптической трещины: а – эллиптическая трещина; б – схема расположения виртуального дефекта в одной из ранжированных зон исследуемой станины (увеличено, проекция на поверхность) [Figure 3. Diagram of a subsurface elliptical crack: а – elliptic crack; б – virtual defect location scheme in one of the ranked areas of the bed under study (enlarged, projection onto the surface)]

В задаче варьировалось два входных параметра – глубина залегания (b) и ранг зоны по опасности разрушения в бездефектном состоянии. Принималось, что $c = 2l$ (по статистическим данным отдела неразрушающего контроля ЗАО «Прочность»), условный предел текучести серого чугуна СЧ35 (ГОСТ 1412-85) 262 МПа [11]. Следовательно, пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений, по (2), составляет 11,13 МПа $\sqrt{м}$. В табл. 3 приведены полученные симплекс-методом значения допустимых параметров (l , мм) эллиптических подповерхностных трещин в зависимости от глубины залегания и уровня действующих напряжений (ранга опасности разрушения). В табл. 3 σ – эквивалентные напряжения, полученные методом конечных элементов. Кроме того, принималось, что в (1) $\sigma_A = \sigma_B = \sigma_D$.

В табл. 3 цветом отмечены ячейки, которые не обеспечивают выполнения условия $l \leq 0,9b$ и $l \leq 0,5t$. Эти дефекты следует рассматривать как поверхностные. На рис. 4, 5 и 6 показаны зависимость допустимых параметров трещин от глубины залегания, величины допустимых параметров дефектов от уровня напряжений в бездефектном состоянии и поверхность допустимых параметров эллиптических дефектов от напряжений и глубины залегания соответственно.

Таблица 3

Зависимость допустимых параметров дефектов от глубины залегания и уровня действующих напряжений [Table 3. Dependence of permissible defect parameters on the occurrence depth and the level of acting stresses]

σ , МПа [MPa]	Глубина залегания дефекта, мм [Depth of the defect, mm]										
	30	27	25	22	20	17	15	12,5	10	5	3
51,0	16,10	15,41	14,86	14,00	13,41	12,30	11,39	10,23	8,88		
45,3	18,40	17,42	16,69	15,60	14,82	13,48	12,35	10,97			
39,7	20,75	19,50	18,59	17,25	16,25	14,63	13,28				
34,0	23,00	21,70	20,56	18,90	17,69						
28,4	25,86	23,89	22,46	20,40							

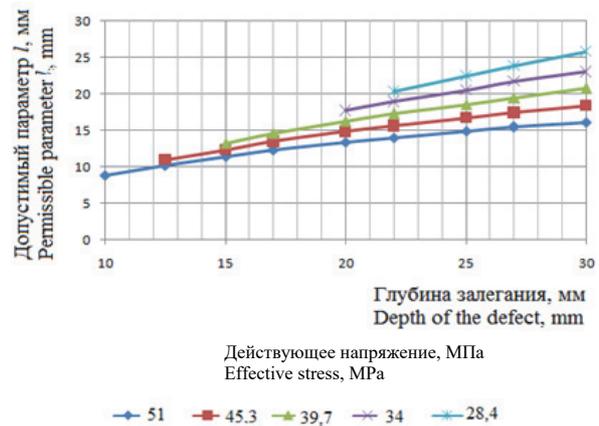


Рис. 4. Зависимость допустимых параметров от глубины залегания, полученная симплекс-методом [Figure 4. The dependence of permissible parameters on the level of stresses, obtained by the simplex method]

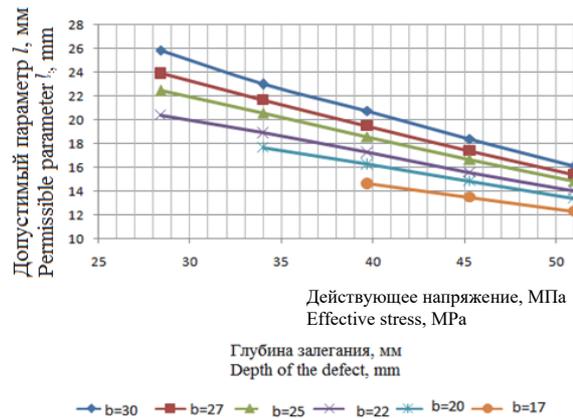


Рис. 5. Зависимость допустимых параметров дефектов от уровня действующих напряжений, полученная симплекс-методом [Figure 5. Dependence of permissible defect parameters on the level of acting stresses obtained by the simplex method]

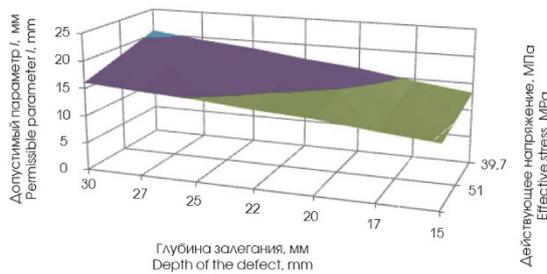


Рис. 6. Поверхность допустимых параметров эллиптических дефектов
 [Figure 6. The surface of the permissible parameters of elliptical defects]

4. Построение математической модели, основанной на зависимости между глубиной залегания, уровнем опасности разрушения и допустимыми параметрами дефекта

Методом Брандона [12] была построена математическая модель вида

$$l = (-20,4 \cdot \ln(\sigma) + 88,98) \cdot (0,009 \cdot \ln(b) + 0,968), \quad (4)$$

где l – допустимые по условию не страгивания параметры дефекта (трещины); σ – номинальное

напряжение в месте формирования дефекта, МПа; b – глубина залегания дефекта, мм.

Модель (4) справедлива для $28,4 \leq \sigma \leq 51,0$ (МПа), $10 \leq b \leq 30$ (мм). Адекватность расчетной модели данным, полученным симплекс-методом, оценивалась критериями, представленными в табл. 4.

5. Обсуждение полученных результатов

Анализ полученной модели позволяет сделать следующие выводы: на допустимые по критерию не страгивания параметры дефекта большее влияние оказывает номинальное напряжение (ранг опасности разрушения в бездефектном состоянии), чем глубина его залегания. Коэффициент эластичности, показывающий, на сколько процентов изменятся допустимые параметры дефектов при изменении напряжений на 1 %, составил $-1,59$. Знак минуса говорит о том, что при увеличении напряжений допустимые параметры уменьшаются. Аналогичный параметр для глубины залегания $+0,01$. Знак плюса говорит о том, что при увеличении глубины залегания допустимые параметры дефекта растут. Такие подходы актуальны не только при исследовании кузнечно-прессового оборудования, но могут быть применимы в других областях [15].

Таблица 4

Критерии оценки адекватности разработанной модели
 [Table 4. Criteria for assessing the adequacy of the developed model]

Обозначение [Designation]	Формула [Formula] [13; 14]	Значение [Value]	
Средняя относительная ошибка [Relative error]	$S_1 = \frac{1}{n} \sum \left \frac{l_i - \tilde{l}_i}{l_i} \right $	0,22	
Средняя квадратичная ошибка [Root mean square error]	$S_3 = \frac{1}{n} \sqrt{\sum \left \frac{l_i - \tilde{l}_i}{l_i} \right ^2}$	0,04	
Коэффициент Тейла [Theil coefficient]	$T = \frac{\left[\sum (l_i - \tilde{l}_i)^2 \right]^{0,5}}{\left[\sum l_i^2 \right]^{0,5} + \left[\sum \tilde{l}_i^2 \right]^{0,5}}$	0,14	
Коэффициент эластичности [Coefficient of elasticity]	$\frac{\partial l}{\partial \sigma} = \bar{\sigma}$	$\bar{\sigma}$	-1,59
	$\frac{\partial l}{\partial b} = \bar{b}$	\bar{b}	0,01

Примечание: l – допустимый параметр, полученный симплекс-методом по модели (4); n – количество «наблюдений», по которым строилась модель ($n = 33$).

Заключение

В настоящее время в связи с расширением рынка вторичной продажи кузнечно-прессового

оборудования и курсом на модернизацию (с сохранением базовых крупногабаритных деталей такого оборудования) в нашей стране возникла

необходимость построения карт допустимой дефектности. Эти карты при наложении на карты дефектности, обнаруженной методами неразрушающего контроля, позволят заранее определять нагрузочную способность оборудования, избегать аварийных ситуаций и юридических проблем при вторичной покупке.

Методика построения карт допустимой дефектности, продемонстрированная в данной статье на примере эллиптических трещин в станине прессы КД2130, предполагает следующие этапы: конечно-элементный расчет базовых деталей с учетом отклонений от предоставляемых фирмой – продавцом чертежей; верификация расчета экспериментом; определение допустимых параметров дефектов по критериям механики разрушения в зависимости от уровня действующих напряжений и их глубин залегания.

Для рассмотренных в статье эллиптических дефектов выявлено, что уровень напряжения больше влияет на величину допустимых параметров дефекта, чем глубина залегания, что необходимо учитывать при обследовании методами неразрушающего контроля.

Список литературы

1. Сивак Б.А., Корнилова А.В. Определение общей долговечности и остаточного ресурса деталей металлургических машин // Тяжелое машиностроение. 2005. № 3. С. 9–11.
2. Корнилова А.В. Разработка методов обеспечения долговечности силовых деталей кузнечно-прессовых машин и инструмента: дис. ... д. т. н. М.: МГТУ «СТАНКИН», 2009. 347 с.
3. Zdenek C. Effect of heat load on a forging press // Procedia Engineering. 2014. Vol. 69. Pp. 897–901.
4. Zdenek C., Karel R. Effect of heat load on a mechanical forging press // Annals of DAAAM & Proceedings. 2016. Vol. 27. Pp. 344–348.
5. Zdenek C., Karel R., Tomas K. Thermal analysis of the forging press LZK 4000 // Annals of DAAAM & Proceedings. 2018. Vol. 29. Pp. 740–745.
6. Paing Thet, Zaya Kyaw, Kornilova A.V. Creation of a design methodology for crank punching machines of

specified durability // IOP Conference Series. Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 675. 012042.

7. Makhutov N.A. Generalized regularities of deformation and fracture processes // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2017. Vol. 87. No. 3. Pp. 217–228.

8. Makhutov N.A., Reznikov D.O. Application of scenario analysis in the assessment of structural reliability of complex technical systems // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. Vol. 44. No. 8. Pp. 675–686.

9. Burdukovsky V.G., Kolmogorov V.L., Migahev B.A. Prediction of resources of materials of machine and construction elements in the process of manufacture and exploitation // Journal of Materials Processing Technology. 1995. Vol. 55. Pp. 292–295.

10. Овчинников А.В. Приближенная формула определения коэффициентов интенсивности напряжений K_I для тел с поверхностными трещинами // Проблемы прочности. 1986. № 11. С. 44–47.

11. Драгунов Ю.Г., Зубченко А.С., Каширский Ю.В., Дегтярев А.Ф., Жаров В.В., Колосков М.М., Орлов А.С., Скоробогатых В.Н. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., перераб. и доп. / под общ. ред. Ю.Г. Драгунова, А.С. Зубченко. М., 2014. 1216 с.

12. Brandon D.B. Developing mathematical models for computer control // Instrument Society of America (ISA) Journal. 1959. Vol. 6. P. 7.

13. Дугерти К. Введение в эконометрику: учебник. 3-е изд. М.: ИНФРА-М, 2009. 465 с.

14. Тейл Г. Экономические прогнозы и принятие решений. М.: Статистика, 1977. 282 с.

15. Малькова М.Ю., Задиранов А.Н. Применение универсального ультразвукового реактора для переработки концентратов руд редкоземельных металлов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 1. С. 20–27.

Для цитирования

Корнилова А.В., Чжо Зяяр. Определение допустимых параметров дефектов в базовых деталях кузнечно-прессовых машин // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 4. С. 308–315. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-4-308-315>

Definition of acceptable parameters of defects in basic details of forging and press machines

Anna V. Kornilova

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

Kyaw Zaya

Moscow State University of Technology "STANKIN", 1 Vadkovskiy Lane, Moscow, 127055, Russian Federation

Article history:

Received: October 31, 2019

Revised: November 25, 2019

Accepted: November 29, 2019

Keywords:

forging equipment, crank press, elliptical crack, allowable defect parameter, threshold value of stress intensity factor

In the Soviet Union, a unique worldwide industry was created for the serial production of forging equipment. Currently, even these machines that have served their design life are in working or maintainable condition. This has led to the fact that there is now a large market for the secondary sale of such machines, including in the countries of Southeast Asia and India. However, with the secondary sale of such equipment, some inevitable damage builds up in the basic parts. In addition, the first copies of such models, put up for secondary sale, were produced at a time when non-destructive testing methods were not developed. Some defects could be undetected. When buying a machine dismantle, transport, install and test. Cases were recorded when defects were strained during installation and testing in the base parts, which made it difficult or impossible to use such equipment. Sometimes this type of equipment (during modernization) is used to carry out technological operations that require more power than previously declared. Therefore, when buying/selling (or upgrading), it is necessary to draw up cards of permissible defects, which, when superimposed on the cards of the detected defects, will allow to reject/determine the remaining life/limit the technological strength of the crank machine so that defects during further operation are not affected and do not lead to emergency situation. The methodology for determining the permissible parameters of subsurface elliptical cracks is shown on the example of a press bed KD2130 (BZMP).

References

1. Sivak BA, Kornilova AV. Opredelenie obshhej dolgovechnosti i ostatochnogo resursa detalej metallurgicheskikh mashin [General durability and residual service life of machine parts]. *Tyazheloe Mashinostroenie*. 2005;3:9–11.
2. Kornilov AV. *Razrabotka metodov obespecheniya dolgovechnosti silovykh detalej kuznechno-pressovykh mashin i instrumenta [Development of methods to ensure the durability of the power parts forging presses and tools]* (Dissertation of Doctor of Technical Sciences). Moscow: MSTU "STANKIN"; 2009.
3. Zdenek C. Effect of heat load on a forging press. *Procedia Engineering*. 2014;69:897–901.
4. Zdenek C, Karel R. Effect of heat load on a mechanical forging press. *Annals of DAAAM & Proceedings*. 2016;27:344–348.
5. Zdenek C, Karel R, Tomas K. Thermal analysis of the forging press LZK 4000. *Annals of DAAAM & Proceedings*. 2018;29:740–745.
6. Paing Thet, Zaya Kyaw, Kornilova AV. Creation of a design methodology for crank punching machines of specified durability. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*. 2019;675:012042.
7. Makhutov NA. Generalized regularities of deformation and fracture processes. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2017;87(3):217–228.
8. Makhutov NA, Reznikov DO. Application of scenario analysis in the assessment of structural reliability of complex technical systems. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2015;44(8):675–686.
9. Burdukovsky VG, Kolmogorov VL, Migachev BA. Prediction of resources of materials of machine and con-

Anna V. Kornilova, Professor of Department of Civil Engineering, Academy of Engineering of RUDN University, Doctor of Technical Science, Docent; Kornilova_av@rudn.ru; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5569-9320>, eLIBRARY SPIN-code: 6569-6240, Author ID: 351426, Researcher ID: U-3353-2017, Scopus Author ID: 7004499009.
Kyaw Zaya, postgraduate of the Composite Materials Department of MSTU "STANKIN"; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0131-1399>; Scopus Author ID: 56416430100.

struction elements in the process of manufacture and exploitation. *Journal of Materials Processing Technology*. 1995;55:292–295.

10. Ovchinnikov AB. Priblizhennaja formula opredelenija koeficientov intensivnosti naprjazhenij dlja tel s poverhnostnymi treshhinami [Approximate formula for determining stress intensity coefficients for bodies with surface cracks]. *Problems of strength*. 1986;11:44–47.

11. Dragunov YG, Zubchenko AS, Kashirsky YV, Degtarev AF, Zharov VV, Koloskov MM, Orlov AS, Skorobogatyh VN. *Marochnik stalej i splavov* [Database of steels and alloys.]. 4th ed. Moscow; 2014.

12. Brandon DB. Developing mathematical models for computer control. *Instrument Society of America (ISA) Journal*. 1959;6:7.

13. Dougherty K. Introduction to econometrics. 3rd ed. Moscow: INFRA-M Publ.; 2009.

14. Tail G. *Jekonomicheskie prognozy i prinjatje reshenij* [Economic projections and decision-making]. Moscow: Statistika Publ.; 1977.

15. Malkova MY, Zadiranov AN. Primenenie universal'nogo ul'trazvukovogo reaktora dlja pererabotki koncentratov rud redkozemel'nyh metallov [Application of the universal ultrasonic reactor for processing of concentrates of ores of rare earth metals]. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(1):20–27.

For citation

Kornilova AV, Kyaw Zaya. Definition of acceptable parameters of defects in basic details of forging and press machines. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019; 20(4):308–315. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-4-308-315>. (In Russ.)

АБОНЕМЕНТ на газету 18230
 журнал (индекс издания)

Вестник РУДН. Серия:
Инженерные исследования
 (наименование издания)

Количество комплектов

На 2020 год по месяцам

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

Куда
 (почтовый индекс) (адрес)

Кому _____
 (фамилия, инициалы)

 Линия отреза

			ДОСТАВОЧНАЯ	18230
ПВ	место	литер	КАРТОЧКА	(индекс издания)

газету Вестник РУДН.
 на журнал Серия: Инженерные исследования
 (наименование издания)

Стои- мость	подписки	руб.	Количество комплектов
	каталожная	руб.	
	пере- адресовки	руб.	

На 2020 год по месяцам

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

						город
						село
почтовый индекс			область			
						район
код улицы			улица			
						фамилия, инициалы
дом	корпус	квартира				