

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

**Международная научная конференция
«Фундаментальные и прикладные
задачи механики»**

Москва, 6–9 декабря 2022 г.

Материалы конференции

В двух частях

Часть 2

**International Scientific Conference
Fundamental and Applied Problems
Of Mechanics (FARM- 2022)**

Moscow, 6–9 December, 2022

The materials of the conference

In two parts

Part 2



Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н. Э. Баумана
2023

УДК 531.510
ББК 22.2 + 22.1
М43

Издание доступно в электронном виде по адресу
<https://bmstu.press/catalog/item/7973/>

Составители: П.М. Шкапов, А.И. Игнатов

М43 **Международная научная конференция «Фундаментальные и прикладные задачи механики».** Москва, 6–9 декабря 2022 г. : материалы конференции : в 2 ч. [сост. П. М. Шкапов, А. И. Игнатов] / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)». — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2023.

ISBN 978-5-7038-6068-7

Ч. 2. — 205, [1] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-6070-0

В сборник включены доклады, представленные на Международной научной конференции «Фундаментальные и прикладные задачи механики» (Fundamental and applied problems of mechanics — FAPM), проходившей в МГТУ им. Н.Э. Баумана 6–9 декабря 2022 г. В часть 2 вошли материалы секций 3–5.

Для научных работников и специалистов в области механики.

УДК 531.510
ББК 22.2 + 22.1

Издается в авторской редакции.

ISBN 978-5-7038-6070-0 (т. 2)
ISBN 978-5-7038-6068-7

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

Международные научные конференции «ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ» (*Fundamental and applied problems of mechanics — FAPM*) с 2012 г. регулярно проводятся в МГТУ им. Н.Э. Баумана на базе Научно-учебного комплекса «Фундаментальные науки» и кафедры «Теоретическая механика» имени профессора Н.Е. Жуковского с участием научных сотрудников из институтов РАН, университетов РФ, известных зарубежных ученых-механиков.

Основной целью данной конференции является представление новых результатов исследований по различным направлениям механики, проводимых в российских и зарубежных научных и образовательных учреждениях.

Очередная конференция FAPM-2022 проходила в завершении года 175-летия со дня рождения великого русского ученого Николая Егоровича Жуковского — «отца русской авиации», основоположника прикладной аэро- и гидромеханики, разработчика теории воздухоплавания, создателя ЦАГИ, основателя кафедры теоретической механики, профессора МВТУ и МГУ.

В 2022 г. открытие конференции, первое пленарное заседание и работа секций прошли в очно-дистанционном режиме в аудиториях Учебно-лабораторного комплекса МГТУ им. Н.Э. Баумана и с трансляцией для участников через платформу Zoom.

Рабочие языки конференции: русский и английский

Материалы к докладам публикуются по рекомендации оргкомитета конференции и приводятся в авторской редакции.

International scientific conferences “Fundamental and applied problems of mechanics (FAPM)”. (ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ) have been held regularly since 2012 in Bauman Moscow State Technical University on the basis of the Scientific and Educational Complex “Fundamental Sciences” and the Professor N.E. Zhukovsky Department of Theoretical Mechanics with participation of scientists from scientific institutions of RAS, RF universities, famous foreign scientists-mechanics.

The main goal of the conference is to present new results of the research in different areas of mechanics, carried out at the Russian and foreign scientific and educational institutions.

In 2022, the opening of the conference, the first plenary session and the work of the sections were held in person and remotely in the classrooms of the Bauman Moscow State Technical University and broadcast to participants via the Zoom platform.

Working languages of the conference: Russian and English

The proceedings of the conference are given in the author’s edition.

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Российский национальный комитет по теоретической и прикладной механике
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН
Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН
Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора
Н.Е. Жуковского
Научно-методический совет по теоретической механике при Министерстве
науки и высшего образования Российской Федерации

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Проф. *А.А. Александров* (председатель), МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва,
Россия
Проф. *В.О. Гладышев* (сопредседатель), МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва,
Россия
Проф. *П.М. Шкапов* (сопредседатель), МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва,
Россия
Astronom C. Bizouard (Co-Chairman), Observatoire de Paris, France
Prof. *K. Matsumoto*, RISE Project, National Astronomical Observatory of Japan,
Japan
Проф. *В.С. Асланов*, Самарский университет, г. Самара, Россия
Проф. *Б.С. Бардин*, МАИ (НИУ), Москва, Россия
Проф. *В.Д. Бертяев*, ТулГУ, г. Тула, Россия
Проф. *С.А. Берестова*, УрФУ, г. Екатеринбург, Россия
Проф. *И.Г. Благовещенский*, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
Проф. *Ю.И. Димитриенко*, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
Проф. *В.В. Ивашкин*, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия
Проф. *В.Т. Калугин*, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Проф. *В.А. Калинин*, ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

Проф. *Г.Н. Кувыркин*, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Проф. *М.Х. Магомедов*, ООО НПФ «Сауно», г. Махачкала, Дагестан, Россия

Проф. *В.И. Майорова*, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Проф. *С.Н. Саяпин*, ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Проф. *Н.И. Сидняев*, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Проф. *Ю.П. Улыбышев*, РКК «Энергия», г. Королёв, Россия

Проф. *Ю.Д. Чашечкин*, ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

Проф. *А.О. Шимановский*, БГУТ, г. Гомель, Республика Беларусь

Ученый секретарь — канд. физ.-мат. наук *А.И. Игнатов*,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

АКАДЕМИЧЕСКИЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Проф. *В.О. Гладышев* (сопредседатель), МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Проф. *В.Н. Зимин* (сопредседатель), МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Проф. *П.М. Шкапов* (сопредседатель), МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Prof. *H. Hanada* (Co-Chairman), director of RISE Project, NAO of Japan, Japan

Astronom *C. Bizouard* (Co-Chairman), Observatoire de Paris, France

Professor *Shuanggen Jin*, Chinese Academy of Sciences, China

Академик РАН *Р.Ф. Ганиев*, ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Академик РАН *И.Г. Горячева*, РНКТПИМ, Москва, Россия

Академик РАН *В.Ф. Журавлёв*, ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

Академик РАН *В.А. Соловьёв*, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Академик РАН *С.Т. Суржиков*, ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

Академик РАН *Д.В. Трещёв*, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Академик РАН *С.Л. Чернышев*, ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, Россия
Чл.-корр. РАН *А.П. Крищенко*, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
Чл.-корр. РАН *А.Н. Морозов*, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
Чл.-корр. РАН *О.С. Нарайкин*, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
Проф. *М.М. Благовещенская*, МГУПП, Москва, Россия
Проф. *В.С. Зарубин*, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
Проф. *Т.А. Исмаилов*, ДГТУ, г. Махачкала, Дагестан, Россия
Проф. *В.А. Самсонов*, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
Проф. *А.М. Цирлин*, ИПС им. А.К. Айламазяна РАН,
г. Переславль-Залесский, Россия
Проф. *В.И. Щербаков*, ВКА им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

Ученый секретарь — канд. физ.-мат. наук, доцент *Е.В. Мелкумова*,
МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

СЕКЦИИ КОНФЕРЕНЦИИ

Математическое моделирование

Теоретическая механика. Небесная механика

Аэро- и гидромеханика

Прикладная механика

Научно-методические и исторические вопросы механики

САЙТ КОНФЕРЕНЦИИ

[http://fn.bmstu.ru/coferences-sec-fs/item/
1143-international-scientific-conference-fapm](http://fn.bmstu.ru/coferences-sec-fs/item/1143-international-scientific-conference-fapm)

E-mail: fapm@bmstu.ru

СЕКЦИЯ 3

Аэро- и гидромеханика

Оценка критического числа Рейнольдса при обтекании цилиндра

А.В. Дмитренко^{1,2},

AVDmitrenko@mephi.ru

М.А. Колосова²

ammsv@yandex.ru

М.И. Колпаков²

С.М. Закутнов²

Д.А. Бойченко²

¹ НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

² РУТ (МИИТ), Москва, Россия

Представлено аналитическое решение для критического числа Рейнольдса при обтекании цилиндра на основе теории стохастических уравнений континуальных законов и эквивалентности мер между случайными и детерминированными движениями [1]. Результаты расчетов показали согласование с экспериментом [2]. Данное решение имеет важное практическое значение при обтекании труб в теплообменных аппаратах и активных зонах реакторов.

Ключевые слова: стохастические уравнения, эквивалентность мер, турбулентность, критическое число Рейнольдса

Литература

- [1] Дмитренко А.В. Эквивалентность мер и стохастические уравнения для турбулентных потоков. ДАН, 2013, т. 450, № 6, с. 651–658. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1028335813060098>
- [2] Шлихтинг Г. *Теория пограничного слоя*. Москва, Наука, 1969, 743 с.

Estimate of the Critical Reynolds Number in a Flow around a Cylinder

A.V. Dmitrenko^{1,2}

AVDmitrenko@mephi.ru

M.A. Kolosova²

ammsv@yandex.ru

M.I. Kolpakov²

S.M. Zakutnov²

D.A. Boychenko²

¹ MEPhI, Moscow, Russia

² RUT, Moscow, Russia

An analytical solution for the critical Reynolds number in a flow around a cylinder is presented based on the theory of stochastic equations of continuum laws and the equivalence of measures between random and deterministic motions [1]. The calculation results showed agreement with experiment [2]. This solution is of great practical importance in the flow around pipes in heat exchangers and reactor cores.

Keywords: stochastic equations, equivalence of measures, critical Reynolds number, turbulence

References

- [1] Dmitrenko A.V. Equivalence of measures and stochastic equations for turbulent flows. *Dokl. Phys.*, 2013, vol. 58 (6), pp. 228–235. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1028335813060098> (In Russ.).
- [2] Schlichting, H.: *Boundary-Layer Theory*. New York, McGraw-Hill, 1968.

Особенности обтекания крышки люка парашютного контейнера при ее отделении от возвращаемого аппарата

В.Т. Калугин¹

kaluginvt@bmstu.ru

А.Ю. Луценко¹

lutsenko@bmstu.ru

Д.К. Назарова¹

dknazarova@bmstu.ru

Д.М. Слободянюк¹

slobodyanyuk@bmstu.ru

М.В. Михайлов²

maksim.mihaylov9@rsce.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

² ПАО «РКК «Энергия», Королев, Россия

Обеспечение безопасности спуска возвращаемого аппарата (ВА) с орбиты является одним из ключевых аспектов выполнения пилотируемых космических полетов. На атмосферном участке движения ВА происходит отделение крышки люка парашютного контейнера (КЛПК), инициирующее ввод в эксплуатацию парашютную систему [1]. Близкое расположение КЛПК относительно ВА после отделения приводит к воз-

никновению интерференции, в результате которой их аэродинамические характеристики (АДХ) отличаются от таковых при изолированном обтекании. Такое изменение может привести к столкновению КЛПК и ВА, что недопустимо для безопасного спуска. Таким образом, выявление аэродинамических особенностей при отделении КЛПК от ВА на начальном участке их совместного движения, а также нахождение диапазонов безопасного отделения являются важными задачами. В данной работе рассматривается решение сопряженной задачи аэродинамики и динамики движения КЛПК при ее отделении от ВА на начальном участке с учетом интерференции в широком диапазоне пространственных углов атаки. Определяются кинематические параметры движения КЛПК, а также ее АДХ после отделения. Выявляются аэродинамические особенности, оценивается влияние параметров обтекания ВА на безопасность отделения КЛПК. Выявлены режимы, при которых происходит столкновение КЛПК и ВА.

Ключевые слова: аэродинамическая интерференция, возвращаемый аппарат, отделяемые элементы конструкции, математическое моделирование обтекания, FlowVision

Литература

- [1] Аксенов А.А. и др. Компьютерное моделирование течения и относительного движения возвращаемого аппарата и крышки люка парашютного контейнера в процессе их разделения на участке спуска. *Космическая техника и технологии*, 2015, № 2, с. 39–50.

The Flow Features of the Parachute Container Hatch Cover during its Separation from the Reentry Vehicle

V.T. Kalugin¹

kaluginvt@bmstu.ru

A.Yu. Lutsenko¹

lutsenko@bmstu.ru

D.K. Nazarova¹

dknazarova@bmstu.ru

D.M. Slobodyanyuk¹

slobodyanyuk@bmstu.ru

M.V. Mikhailov²

maksim.mihaylov9@rsce.ru

¹ **BMSTU, Moscow, Russia**

² **S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia, Korolyov, Russia**

Ensuring the safety of the reentry vehicle (RV) descent from orbit is one of the key aspects of manned space flights. The separation of the parachute container hatch cover (PCHC) occurs on the atmospheric section of the RV movement. This is initiating the parachute system commissioning [1]. The PCHC close location relative to the RV leads to the aerodynamic interference occurrence after separation. As a result their aerodynamic characteristics differ from those in an isolated flow. This can lead to a collision between the PCHC and the RV. Thus, the identification of aerodynamic features during the PCHC separation from the RV, as well as finding the safe separation ranges, are important tasks. In this paper, we consider the solution of the conjugate problem of PCHC aerodynamics and its motion dynamics when it is separated from the RV in the initial section, taking into account aerodynamic interference in a wide range of spatial angles of attack. The PCHC movement

kinematic parameters are determined, as well as its aerodynamics characteristic after separation. The aerodynamic features are revealed. The influence of the RV flow around parameters on the separation safety of the PCHC is assessed. The modes under which the PCHC collision and RV occur are revealed.

Keywords: aerodynamic interference, reentry vehicle, separable structural elements, CFD, FlowVision

Reference

- [1] Aksenov A.A. et al. Computer simulation of the flow and relative motion of the returned apparatus and the hatch of the parachute container during separation at the descent site. *Space Engineering and Technologies*, 2015, no. 2, pp. 39–50. (In Russ.).

Аэродинамические характеристики перфорированных элементов конструкции летательных аппаратов

Д.К. Назарова

dknazarova@bmstu.ru

М.Д. Калугина

kaluginamd@student.bmstu.ru

Н.И. Кирдяев

kirnyaevni@student.bmstu.ru

Е.Ю. Прокопов

prokopoveyu@student.bmstu.ru

Н.С. Семенов

semenovns@student.bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Проведены экспериментальные и численные исследования аэродинамических характеристик перфорированных цилиндрических и конических тел. Проанализировано изменение аэродинамических коэффициентов и структур обтекания в зависимости от угла атаки при дозвуковой скорости набегающего потока.

Ключевые слова: аэродинамические характеристики, дозвуковая аэродинамическая труба, перфорация, цилиндр, конус, усеченный конус

Введение. В конструкциях летательных аппаратов различного назначения применяют элементы со сквозной перфорацией поверхности. Форма этих элементов может быть различной: плоской, цилиндрической, конической. Течение у поверхности перфорированных конструкций сложное: через отверстия при любых углах атаки осуществляется перетекание газа, которое приводит к перераспределению давления и отличию аэродинамических характеристик (АДХ) перфорированных тел от соответствующих сплошных. Обзор литературы показал, что на настоящий момент не проводилось комплексных исследований АДХ перфорированных элементов конструкции различной формы, однако во многих работах отмечают широкие перспективы использования перфорации [1].

Экспериментальные исследования. Для решения задачи определения АДХ перфорированных цилиндрических и конических тел (рис. 1) проведены экспериментальные исследования в дозвуковой аэродинамической трубе Т-500 МГТУ им. Н.Э. Баумана.

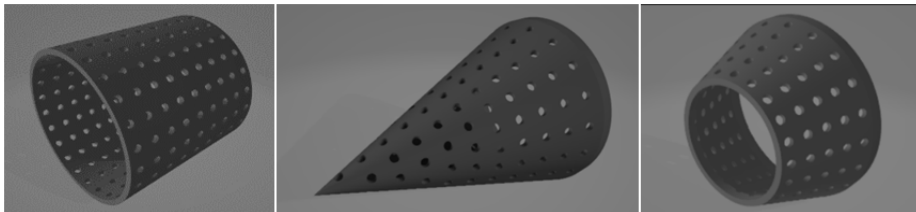


Рис. 1. Вид исследуемых моделей

Диаметр миделя всех моделей составлял 90 мм, толщина оболочек — 3 мм, диаметр отверстий перфорации — 4 мм. Рассмотрены три цилиндрические модели с удлинением 1,0, 1,3 и 1,9; две модели конуса и две модели усеченного конуса с углами полураствора $\beta = 10^\circ$ и 20° .

В эксперименте скорость набегающего потока V_∞ составляла 25 м/с, число Рейнольдса $Re = 1,7 \cdot 10^5$, угол атаки α для цилиндрической модели изменялся от 0 до 90° с шагом $\Delta\alpha = 10^\circ$, для моделей конуса и усеченного конуса — от 0 до 30° с шагом $\Delta\alpha = 5^\circ$. Усеченные конусы располагались большим диаметром к набегающему потоку. По результатам экспериментальных исследований определены аэродинамические силы и вычислены аэродинамические коэффициенты продольной и нормальной сил c_x и c_y , момента тангажа m_z перфорированных тел.

Численное моделирование. Проведено в программе SolidWorks. Для проведения каждого расчета создавалась расчетная сетка с количеством ячеек $\approx 2,5$ млн. В области больших градиентов давления и скорости проводилось дополнительное измельчение. В численном расчете параметры набегающего потока соответствовали экспериментальным. Рабочая часть трубы и поддерживающие устройства не воспроизводились.

Анализ аэродинамических характеристик. По полученным данным построены зависимости АДХ от угла атаки (рис. 2–4).

Из графиков видно, что при увеличении угла атаки коэффициент c_y всех исследованных перфорированных цилиндров возрастает, величина коэффициента m_z также увеличивается. С увеличением удлинения моделей возрастает c_y за счет роста площади поверхности, однако, коэффициенты m_z трех моделей цилиндров имеют схожие значения.

На рис. 3 показаны графики зависимостей АДХ перфорированных конических тел.

При увеличении угла атаки коэффициент c_x всех исследованных перфорированных конусов убывает. На величину коэффициентов c_x влияет и угол полураствора конусов: при больших β коэффициенты c_x выше. Аналогичные

закономерности характерны и для зависимостей $c_x(\beta)$ конусов без перфорации. С ростом β коэффициенты c_y всех исследованных моделей конусов увеличиваются. При больших значениях β коэффициенты c_y моделей и полных, и усеченных конусов имеют меньшие значения во всем исследованном диапазоне β , что обусловлено большей длиной моделей с меньшим углом полураствора.

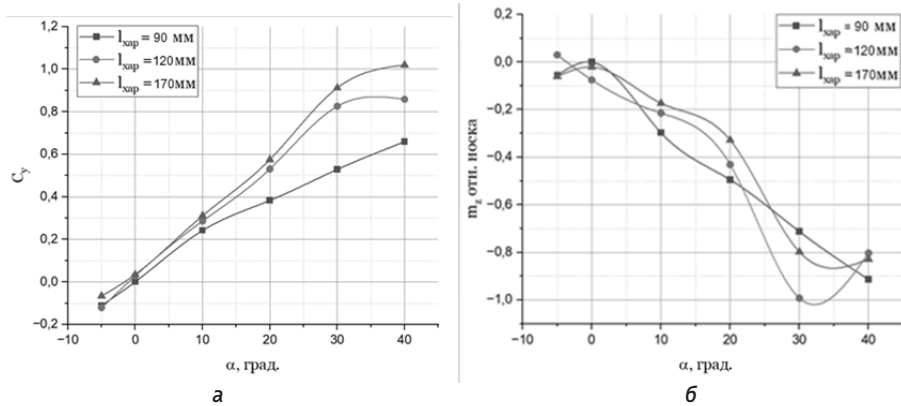


Рис. 2. АДХ перфорированных цилиндров

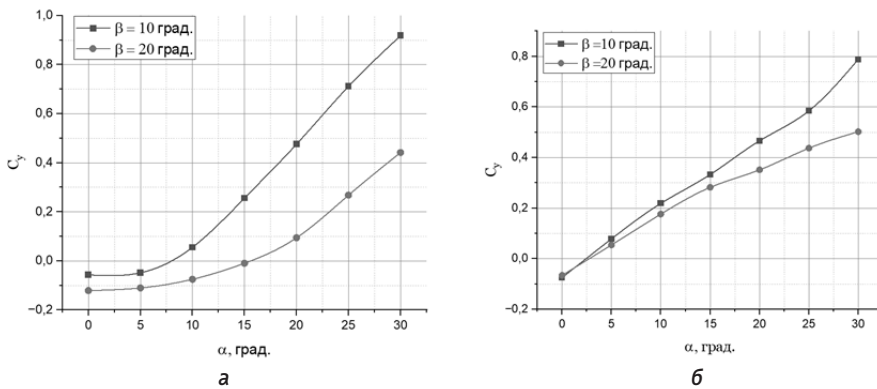


Рис. 3. АДХ перфорированных конусов (а) и усеченных конусов (б)

В результате численного моделирования получены аэродинамические коэффициенты и структуры обтекания оболочек. Рассчитанные АДХ совпадают с экспериментальными данными, максимальное отличие составило 10 % (рис. 4).

На рис. 5 показано распределение давления по поверхности перфорированного цилиндра и конусов.

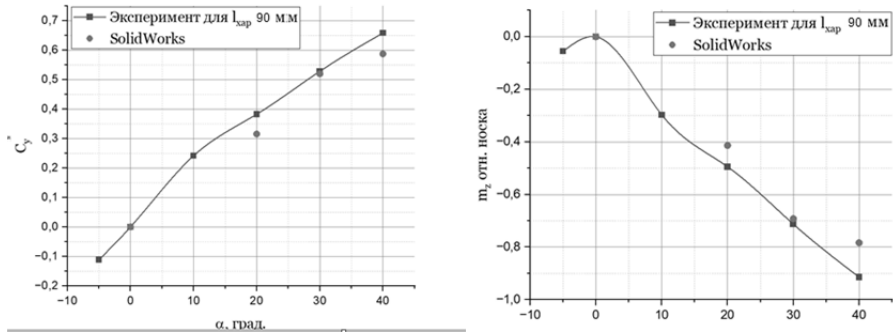


Рис. 4. АДХ перфорированного цилиндра с единичным удлинением

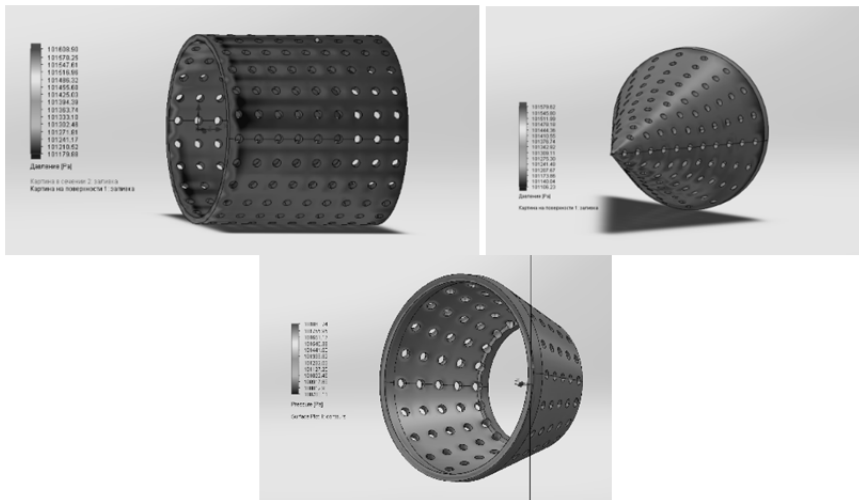


Рис. 6. Распределение давления по поверхности исследованных тел

Закключение. Экспериментально и численно получены аэродинамические характеристики перфорированных цилиндрических и конических тел. Выявлено, что при небольшом диаметре отверстий перфорации изменение угла атаки и геометрических размеров влияют на АДХ цилиндров и конусов аналогично случаю без перфорации. Течение у поверхности перфорированных тел имеет сложный характер, через отверстия при всех исследованных углах атаки протекает газ, что приводит к сложному характеру распределения давления (рис. 5).

Литература

- [1] Golubev A.G., Stolyarova E.G., Kalugina M.D. Control of separated and vortex flow using perforated aircraft surface. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2171, no. 130002. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5133269>

Aerodynamic Characteristics of Perforated Aircraft Structural Elements in Subsonic Flow

D.K. Nazarova dknazarova@bmstu.ru
M.D. Kalugina kaluginamd@student.bmstu.ru
N.I. Kirnyaev kirnyaevni@student.bmstu.ru
E.Yu. Prokopov prokopoveyu@student.bmstu.ru
N.S. Semenov semenovns@student.bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

The aerodynamic characteristics of perforated cylindrical and conical bodies are experimentally and numerically determined. An analysis of flow structures and aerodynamic coefficients depending on the angle of attack at a subsonic speed of the oncoming flow is carried out.

Keywords: aerodynamic characteristics, subsonic wind tunnel, perforation, cylinder, cone, truncated cone

References

- [1] Golubev A.G., Stolyarova E.G., Kalugina M.D. Control of separated and vortex flow using perforated aircraft surface. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2171, no. 130002. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5133269>

Коэффициент восстановления температуры при сверхзвуковом течении газовых смесей в малых каналах

Д.С. Кочуров kochurov_ds@yahoo.com
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Выполнен анализ существующих методик для вычисления коэффициента восстановления температуры r на адиабатной стенке. Показано, что при сверхзвуковом течении бинарных смесей газов на основе гелия He с малыми числами Прандтля Pr рассмотренные методики дают сильно различающиеся результаты, а экспериментальные данные по r при малых Pr в печати отсутствуют. Проведение экспериментов по определению r при течении смесей связано с необходимостью уменьшения проходных сечений сверхзвуковых каналов для снижения массовых расходов, что может привести к смыканию тепловых пограничных слоев от соседних стенок. Для оценки влияния смыкания тепловых пограничных слоев на значение r , а также для определения минимально возможных размеров сверхзвуковых сопел, выполнены серии *CFD* расчетов течений газовых смесей с малыми значениями Pr .

Ключевые слова: бинарные смеси газов, коэффициент восстановления температуры, малые числа Прандтля

Введение. Известно, что при обтекании теплоизолированной стенки сжимаемым потоком газа при значении молекулярного числа Прандтля $Pr < 1$ температура восстановления на стенке $T_{ст}$ меньше среднерасходной температуры торможения потока $T_{сп}^*$ в данном нормальном к поверхности стенки сечении [1, 2]. Температура $T_{ст}$ для сжимаемого потока газа может быть охарактеризована безразмерным коэффициентом восстановления температуры:

$$r = \frac{T_{ст} - T_{сп}}{T_{сп}^* - T_{сп}}. \quad (1)$$

Существуют методики для расчета r на свободной пластине в зависимости от Pr , числа Рейнольдса по длине Re_x и числа Маха M ядра потока, некоторые из которых подробно рассмотрены в работе [3]. Для случая обтекания плоской непроницаемой стенки при ламинарном режиме течения известно аналитическое соотношение Польгаузена:

$$r = \sqrt{Pr}. \quad (2)$$

Для турбулентного течения применяется соотношение Аккермана

$$r = \sqrt[3]{Pr}. \quad (3)$$

Более сложные зависимости r с явным учетом влияния Re_x и M предложены Себаном, Широковым, Джонсоном, Рубезиным, Сквайром, а также Такером и Мазленом. Кроме этого, известны результаты численного расчета безградиентного потока, обтекающего плоскую непроницаемую стенку [4]. Существует множество экспериментальных данных при обтекании плоской непроницаемой пластины сжимаемым потоком воздуха ($Pr \approx 0,7$), из которых следует что для развитого турбулентного режима течения при числах Рейнольдса $Re_x > 10^7$ и числах Маха потока $M > 1$ величина $r \approx 0,88$ [5]. Известны также отдельные экспериментальные данные [6] для смеси H_2 – Ar .

В работе [2] было показано, что r монотонно уменьшается с уменьшением Pr от 1, увеличивается с ростом Re_x и уменьшается при росте M . Соотношения Аккермана, Такера-Мазлена и методика [4] дают очень хорошие результаты для воздуха при $Re_x > 10^7$, совпадающие с данными экспериментов. Однако при уменьшении Pr до 0,2 (смесь He – He с $m \approx 40$ г/моль) максимальное расхождение значений r , полученных по этим методикам, достигает 40 % при $M = 4$ и $Re_x = 10^7$. Был сделан вывод о необходимости проведения экспериментов по измерению r на плоской стенке при течении газовых смесей с малыми Pr .

Влияние смыкания пограничных слоев на коэффициент восстановления температуры. В связи с тем, что специальные смеси на основе He с малым Pr поставляются в баллонах ограниченной емкости, экспериментальное измерение $T_{ст}$ и r на адиабатной стенке при течении таких смесей связано с необходимостью уменьшения проходных сечений измерительного участка для снижения массового расхода. Проходное сечение измерительного участка

можно уменьшать до таких размеров, при которых распределение r по длине канала начнет отличаться от распределения r на плоской пластине. Это отличие после поправки профиля канала на толщину вытеснения и обеспечения равномерных по длине параметров ядра будет связано только со смыканием пограничных слоев от соседних стенок и исчезновением ядра потока.

Для оценки влияния смыкания пограничных слоев на значения r были проведены расчеты процессов сжимаемого дозвукового течения смеси He–Ar с $Pr = 0.4$ (молекулярная масса 20 г/моль) в щели 5 мм между двумя пластинами и для сравнения на свободной пластине. Расчеты выполнены в среде ANSYS Fluent с моделью турбулентности $k-\omega$ SST (турбулентное число Прандтля для уравнений с осредненными величинами 0,9) для двух степеней турбулентности Tu во входном сечении: 1 и 5 % (рис. 1). Давление торможения при входе на свободную пластину выбрано таким, чтобы число Рейнольдса Re_x по длине пластины соответствовало значениям Re_x по длине щели.

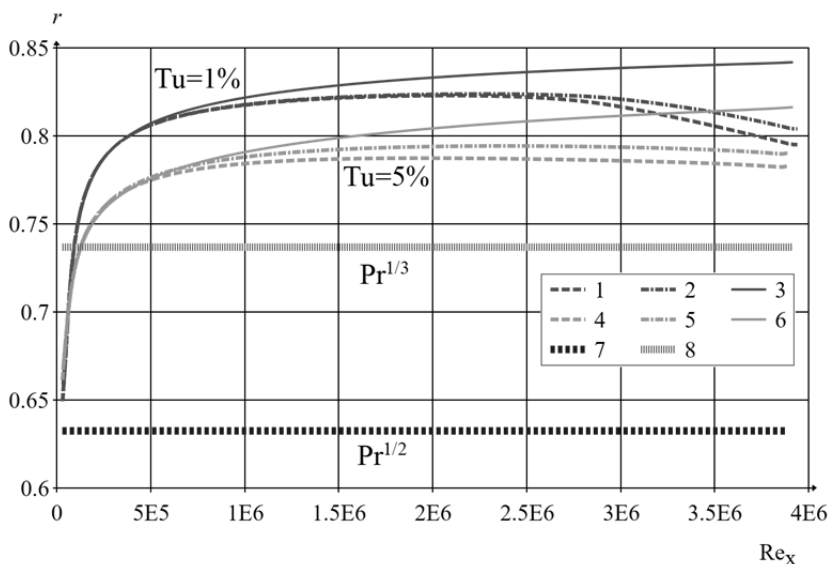


Рис. 1. Зависимости коэффициента восстановления температуры r от числа Рейнольдса Re_x для свободной пластины и для щели между двумя пластинами: 1 — щель, $T^* = T^*_{\max}$; 2 — щель, $T^* = T^*_{\text{ср}}$; 3 — свободная пластина; $Tu = 1\%$; 4 — щель, $T^* = T^*_{\max}$; 5 — щель, $T^* = T^*_{\text{ср}}$; 6 — свободная пластина; $Tu = 5\%$; 7 — соотношение (2); 8 — соотношение (3)

На рис. 1 видно, что на начальном участке значения r увеличиваются от значений для ламинарного обтекания, соответствующих соотношению Польгаузена $r = Pr^{1/2}$, причем на начальном участке кривые для свободной пластины и для течения в щели практически совпадают. Однако на некотором расстоянии от входа поток в щели из-за формирующихся пограничных слоев начинает разгоняться, а значения r становятся меньше по сравнению со зна-

чениями r на свободной пластине. Дальнейший рост пограничных слоев в щели приводит к их смыканию, и температура торможения в центре потока T^* начинает увеличиваться по мере роста продольной координаты. В связи с этим кривые r , рассчитанные по среднерасходной T^*_{cp} и по температуре T^*_{max} в центре потока, на некотором удалении от входа начинают отличаться. При чем чем выше начальная Tu , тем раньше смыкаются пограничные слои.

Поправкой размеров щели (введением небольшого угла раскрытия пластин по длине) на толщину вытеснения можно добиться лишь отсутствия ускорения потока по длине, то есть совпадения кривых r для свободной пластины и для щели на участке до смыкания. Однако в связи с тем, что толщина вытеснения в несколько раз меньше толщины пограничного слоя на каком-то расстоянии при малых размерах канала пограничные слои все равно сомкнутся на некотором расстоянии от начала щели. Задачей, таким образом, является определить такой минимальный размер канала, при котором обеспечивается достаточная продольная длина ядра потока от начала формирования пограничного слоя и до его смыкания.

Выбор минимальных размеров сопла Лавалья. Для ограничения влияния начальной Tu на скорость смыкания пограничных слоев и для увеличения размеров проходного сечения в качестве измерительного участка целесообразно использовать плоское сопло Лавалья, а именно канал квадратного сечения за разгонным и выравнивающим участком. В этом канале необходимо обеспечить ядро потока с равномерным распределением параметров как в сечении, так и по длине. Необходимая длина сверхзвукового ядра потока зависит от максимального значения Re_x , отсчитываемого от критического сечения. В данной работе максимальным значением Re_x было принято значение $5 \cdot 10^6$.

В процессе профилирования сопел Лавалья в качестве рабочего тела была выбрана смесь He–Ar с молекулярной массой 20 г/моль, давление торможения на входе 2 атмосферы, температура торможения на входе 300 К, число Маха в ядре за выравнивающим участком равно 2. Необходимая протяженность сопла от критического сечения и до момента смыкания пограничных слоев, соответствующая $Re_x = 5 \cdot 10^6$, равна 230 мм при условии, что статическая плотность, скорость и коэффициент динамической вязкости взяты в критическом сечении сопла при числе Маха 1.

Рассматриваются сопла с четырьмя разными размерами квадратного сечения за выравнивающим участком (до введения поправок на толщины вытеснения): 5, 10, 15, 20 мм. Процесс профилирования начинался с расчета идеальных сопел по методике [7] без учета вязких сил в потоке газа. Процессы течения в полученных таким образом соплах затем рассчитывались в среде ANSYS Fluent с моделью турбулентности $k-\omega$ SST. В результате расчетов находилось распределение толщин вытеснения по длине сопел, исходные профили поправлялись на эту величину. Процесс повторялся итерациями, пока изменение скорости ядра потока после выравнивающего участка сопел из-за нарастания пограничных слоев не превышало полпроцента по всей длине.

Результаты расчетов r по длине для четырех спрофилированных сопел, а также по длине пластины, обтекаемой потоком с $M = 2$, представлены на рис. 2. Число Рейнольдса Re_x отсчитывается от критических сечений сопел и от начала пластины. Видно, что значения r для спрофилированных сопел с размерами идеальных сечений 10, 15 и 20 мм вплоть до $Re_x = 5 \cdot 10^6$ полностью совпадают со значениями r при обтекании плоской пластины. Однако в сопле 5 мм пограничный слой смыкается значительно раньше координаты 230 мм ($Re_x = 5 \cdot 10^6$), о чем можно судить по уменьшению значений r по сравнению со значениями для плоской пластины.

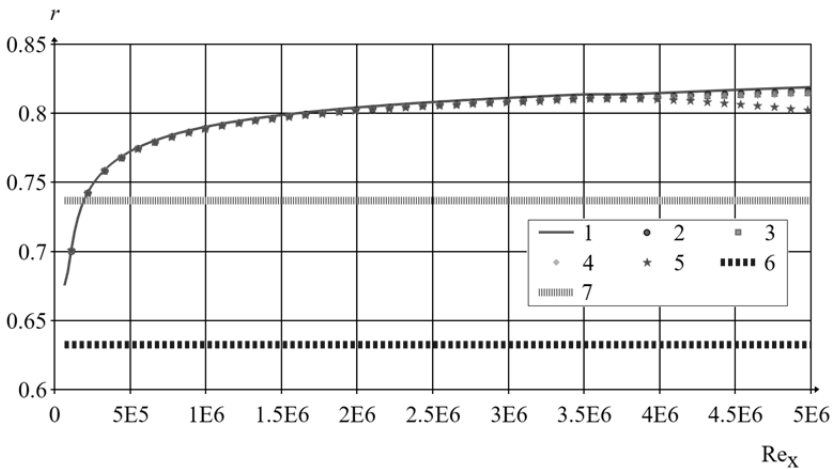


Рис. 2. Зависимости коэффициента восстановления температуры r от числа Рейнольдса Re_x для пластины и для сверхзвуковых сопел: 1 — пластина, $M = 2$; 2 — сопло 20 мм; 3 — сопло 15 мм; 4 — сопло 10 мм; 5 — сопло 5 мм; 6 — соотношение (2); 7 — соотношение (3)

Закключение. Измерение значений коэффициента восстановления температуры r целесообразно проводить в сверхзвуковом канале квадратного сечения за выпрямляющим участком сопла Лавалья, причем чем меньше сечение, тем меньший расход смесей требуется. В результате *CFD* расчетов сжимаемого течения в щели между двумя пластинами было установлено, что смыкание пограничных слоев в малых каналах приводит к уменьшению значений r . Было также показано, что для смеси He-Ar для чисел Рейнольдса Re_x в пределах $5 \cdot 10^6$ смыкания пограничных слоев по длине сопла Лавалья удается избежать при размере сечения сверхзвуковой части за выпрямляющим участком (до введения поправок на толщину вытеснения) от 10 мм.

Литература

- [1] Leont'ev A.I. Gas-dynamic method of temperature stratification (a review). *Fluid Dynamics*, 2002, vol. 37, no 4, pp. 512–529.

- [2] Leontiev A.I., Zditovets A.G., Vinogradov Yu.A., Strongin M.M., Kiselev N.A. Experimental investigation of the machine-free method of temperature separation of air flows based on the energy separation effect in a compressible boundary layer. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, vol. 88, pp. 202–219.
- [3] Кочуров Д.С., Щеголев Н.Л. Анализ влияния состава смесей на основе гелия на коэффициент восстановления температуры и число Прандтля. *Аэрокосмический научный журнал. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2016, № 6, с. 26–48. DOI: <https://doi.org/10.7463/aersp.0616.0851777>
- [4] Леонтьев А.И., Лущик В.Г., Якубенко А.Е. Коэффициент восстановления в сверхзвуковом потоке газа с малым числом Прандтля. *Теплофизика высоких температур*, 2006, т. 44, № 2, с. 238–245.
- [5] Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. Москва, Энергоатомиздат, 1985, 320 с.
- [6] Виноградов А.Ю., Ермолаев И.К., Здитовец А.Г., Леонтьев А.И. Измерение равновесной температуры стенки сверхзвукового сопла при течении смеси газов с низким значением числа Прандтля. *Известия РАН. Энергетика*, 2005. № 4, с. 128–133.
- [7] Овсянников А.М., Пирумов У.Г., Плетнева Е.М., Росляков Г.С. *Атлас плоских сопел*. Москва, Изд-во Моск. ун-та, 1976, 108 с.

Ударно-волновая гипотеза вихревого эффекта Ранка — Хилша

Д.А. Жидков

zhidkov.da@bmstu.ru

М.А. Жидков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Вихревой эффект Ранка — Хилша используется в различных отраслях промышленности для получения холода и сепарации жидкости из газового потока. На сегодняшний день теория вихревого эффекта до конца не исследована. Широко распространенные модели центробежной теории и теории турбулентности не могут объяснить повышенную холодопроизводительность, особенно ярко выраженное при доле холодного потока $\mu \rightarrow 1,0$. Предложенная ударно-волновая гипотеза может объяснить особенности работы вихревых труб, согласно которым дополнительный холод генерируется за счет вибраций (пульсаций и прецессии внутреннего ядра вихря), возникающих при работе трубы.

Ключевые слова: вихревой эффект, вихревая труба, ударно-волновая гипотеза

Литература

- [1] Жердев А.А., Жидков Д.А. и др. Сравнительный анализ эффективности очистки природного газа при низкой степени расширения с применением дросселя или высокорасходной трехпоточной вихревой трубы. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2022, № 8, с. 18–22.

Shock-Wave Hypothesis of the Ranque–Hilsch Vortex Effect

D.A. Zhidkov

zhidkov.da@bmstu.ru

M.A. Zhidkov

BMSTU, Moscow, Russia

The Ranque — Hilsch vortex effect is used in various industries to obtain cold and separate liquid from a gas stream. To date, the theory of the vortex effect has not been fully explored. Widespread models of centrifugal theory and turbulence theory cannot explain the increased cooling capacity, which is especially pronounced at a cold flow fraction $\mu \rightarrow 1.0$. The proposed shock-wave hypothesis can explain the features of the operation of vortex tubes, according to which additional cold is generated due to vibrations (pulsations and precession of the inner core of the vortex) that occur during the operation of the tube.

Keywords: vortex effect, vortex tube, shock wave hypothesis

References

- [1] Zherdev A.A., Zhidkov D.A. Comparative analysis of the efficiency of natural gas purification at a low degree of expansion using a throttle or a high-flow three-flow vortex tube. *Chemical and oil and gas engineering*, 2022, no. 8, pp. 18–22. (In Russ.).

Решения с бегущими волнами уравнений объемной фильтрации суспензии

Н.Е. Леонтьев

leontiev_n@mail.ru

К. Таурбаева

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Строятся решения с бегущими волнами для системы уравнений объемной фильтрации суспензии в пористой среде в рамках модели с различными скоростями несущей жидкости и взвешенных подвижных частиц. Ранее решения с бегущими волнами рассматривались для различных односкоростных моделей, в которых скорости несущей жидкости и взвешенных частиц совпадают (например, [1, 2]). В случае, когда скорости частиц и несущей жидкости различаются на множитель, произвольным образом зависящий от концентрации, а локальная скорость осаждения частиц на пористый скелет пропорциональна, в частности, локальному потоку частиц, решение получено в квадратурах. В частном случае, когда скорости подвижных фаз отличаются на множитель, линейно зависящий от концентрации, в пространстве определяющих параметров найдены области, соответствующие физически реализуемым решениям с учетом естественных ограничений на значения пористости и концентрации.

Ключевые слова: бегущая волна, пористая среда, объемная фильтрация, суспензия

Литература

- [1] Капранов Ю.И. О фильтрации взвеси твердых частиц. *Прикладная математика и механика*, 1999, т. 63, вып. 4, с. 620–628.
- [2] Хужаеров Б. Модель фильтрации суспензии с учетом кольматации и суффозии. *Инженерно-физический журнал*, 1992, т. 63, № 1, с. 72–79.

Travelling Wave Solutions to Deep Bed Filtration Equations

N.E. Leontiev

leontiev_n@mail.ru

K. Taurbaeva

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Travelling wave solutions to the deep bed filtration system are constructed for a model with different velocities of carrier fluid and suspended particles. Some travelling wave solutions for different one-velocity models (with equal velocities of particles and carrier fluid) were previously considered, for example, in [1, 2]. The solution in quadratures is obtained when the velocity of the carrier fluid and that of the particles differ by a concentration-dependent factor and the local rate of particle deposition is proportional, in particular, to the local suspended particle flow rate. For the special case of linear concentration-dependent factor, the physically realizable domains are found in the space of governing parameters.

Keywords: travelling wave, porous medium, deep bed filtration, suspension

References

- [1] Kapranov Yu.I. The filtering of a suspension of solid particles. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1999, vol. 63, issue 4, pp. 595–602. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-8928\(99\)00074-X](https://doi.org/10.1016/S0021-8928(99)00074-X)
- [2] Khuzhaerov B. Model of suspension filtration with account of colmatation and suffosion. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1992, vol. 63 (1), pp. 707–713. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00853967>.

Анизотропная модель объемной фильтрации суспензии в пористой среде

Н.Е. Леонтьев

leontiev_n@mail.ru

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Предлагается математическая модель течения суспензии внутри пористой среды, учитывающая возникновение локальной анизотропии пористого скелета при осаждении взвешенных частиц. В традиционно используемых моделях объемной фильтрации [1, 2] отложение частиц учитывается через изменение локальных значений пористости и коэффициента проницаемости, при этом засоренная пористая среда предполагается изотропной, хотя и неоднородной по пространству. В предлагаемой анизотропной модели засорение пористой матрицы учитывается с помощью кинетических уравнений для ло-

кальных значений пористости и элементов тензора проницаемости. В качестве иллюстративного примера приводится замкнутая система уравнений для модельной среды с поровым пространством в виде перпендикулярных пучков капилляров. Помимо задач засорения, предложенный подход может использоваться для моделирования разрушения пористых сред потоком флюида (карстовые явления, таяние снега и т. д.) с образованием анизотропной сети внутренних каналов. Подобные модели очевидным образом обобщаются на среды с двойной пористостью (модель трещиноватых коллекторов).

Ключевые слова: пористая среда, объемная фильтрация, анизотропия, суспензия

Литература

- [1] Herzig J.P., Leclerc D.M., Le Goff P. Flow of suspensions through porous media. Application to deep filtration. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1970, vol. 62, issue 5, pp. 8–35. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie50725a003>
- [2] Leontiev N.E., Roshchin E.I. Exact solutions to the deep bed filtration problem for low-concentration suspension. *Moscow University Mechanics Bulletin*, 2020, vol. 75, no. 4, pp. 96–101. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0027133020040056>

An Anisotropic Deep Bed Filtration Model

N.E. Leontiev

leontiev_n@mail.ru

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

We propose a mathematical model for suspension flow through a porous media with regard to the local anisotropy of porous skeleton due to the deposition of particles. In traditional deep bed filtration models, the deposition of suspended particles involves a change in local values of the porosity and the permeability, the contaminated porous matrix being supposed to be isotropic and spatially inhomogeneous. In the proposed anisotropic model, the clogging of porous matrix is taken into account by kinetic equations for local values of the porosity and the elements of the permeability tensor. As an example, a closed system of equations is presented for a medium with the pores formed by perpendicular bundles of capillaries. Apart from contamination problems, the proposed approach may be used for modeling the destruction of porous media by the fluid (karst erosion, snow melting, etc.) with the formation of anisotropic network of internal channels. Such models can be generalized to double-porosity media (fractured collectors).

Keywords: porous medium, deep bed filtration, anisotropy, suspension

Уравнение волнового бора

А.Ю. Якимов

ajkimov@mail.ru

НИИ механики МГУ, Москва, Россия

Получено нестационарное уравнение волнового бора без обрушения. Это течение наблюдается при входе прилива в реку. Начальное условие берется в виде моно-

тонной функции. Гладкая форма волны дает возможность применить формулу М.А. Лаврентьева. Уравнение описывает эволюцию гладкого бора в цуг нелинейных волн. В предельном решении длина волны стремится к бесконечности. Интегрирование формулы М.А. Лаврентьева позволяет аналитически получить потенциал уединенной волны. Показано выполнение уравнения неразрывности и условия непротекания с точностью до куба малого параметра. Приводится сравнение теоретических результатов с численными расчетами и экспериментами в гидроканале МГУ.

Ключевые слова: волновой бор, длина нелинейной волны, потенциал уединенной волны, формула М.А. Лаврентьева, гидроканал МГУ

The Wave Bore Equation

А.Ю. Yakimov

ajkimov@mail.ru

Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

A nonstationary equation of the wave bore without collapse is obtained. This flow is observed when the tide enters the river. The initial condition is taken as a monotone function. The smooth waveform makes it possible to apply the formula of M.A. Lavrentiev. The equation describes the evolution of a smooth bore into a cusp of nonlinear waves. In the limiting solution, the wavelength tends to infinity. Integrating the formula of M.A. Lavrentiev allows us to analytically obtain the potential of a solitary wave. It is shown that the continuity equation and the non-flow condition are fulfilled up to the cube of a small parameter. The theoretical results are compared with numerical calculations and experiments in the MSU hydrachannel.

Keywords: wave bore, nonlinear wave length, solitary wave potential, M.A. Lavrentev formula, MSU hydrachanal

Экспериментальное исследование влияния на эффект Эккерта — Вайса режимов обтекания пары круговых цилиндров

А.Г. Здитовец

zditovets@mail.ru

Н.А. Киселев

Ю.А. Виноградов

С.С. Попович

НИИ механики МГУ, Москва, Россия

Температура поверхности кругового цилиндра, помещенного в поперечный поток сжимаемого газа, может изменяться от значений равных температуре торможения набегающего потока (в передней критической точке), до значений близких, а иногда меньших статической температуры набегающего потока (в окрестности задней критической точки). Данный эффект впервые обнаружен в работе Эккерта и Вайса [1].

В работе [2] на основе прямого численного моделирования было показано, что эффект Эккерта — Вайса зависит от режима обтекания пары круговых цилиндров поперечным потоком и может быть как больше, так и меньше значений, достигаемых на одиночном цилиндре при идентичных параметрах набегающего потока. В настоящем докладе приведены данные по распределению температуры и давления на поверхности одного из двух цилиндров. Показана корреляция между коэффициентами давления и восстановления температуры.

Ключевые слова: эффект Эккерта — Вайса, коэффициент восстановления температуры, поперечное обтекание

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № №22-29-00443).

Литература

- [1] Eckert E., Weise W. Messungen der Temperaturverteilung auf der Oberfläche schnell angestromter unbeheizter Körper. *Forsch. Geb. Ing. Wesen*, 1942, vol. 13, pp. 246–254.
- [2] Alekseyuk A.I. The Eckert–Weise effect and energy separation under the flow interference behind side-by-side cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, vol. 915, art. A95. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.128>

Experimental Study of the Eckert–Weise Effect under the Flow Regimes around a Pair of Circular Cylinders

A.G. Zditovets

zditovets@mail.ru

N.A. Kiselev

Yu.A. Vinogradov

S.S. Popovich

Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The surface temperature of a circular cylinder placed in a transverse flow of a compressible gas can vary from values equal to the free flow stagnation temperature (at the front critical point) to values close to, and sometimes lower than, the free flow static temperature (in the vicinity of the rear critical point). This effect was first discovered by Eckert and Weise [1]. Based on direct numerical simulation, it was shown in [2] that the Eckert–Weise effect depends on the flow interference behind side-by-side circular cylinders and can be either greater or smaller than the values achieved on a single cylinder with identical parameters of the oncoming flow. This report presents data on the distribution of temperature and pressure on the surface of one of the two cylinders. The correlation between pressure and temperature recovery factors is shown.

Keywords: Eckert – Weise effect, temperature recovery factors, cross flow

The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project № 22-29-00443).

References

- [1] Eckert E., Weise W. Messungen der Temperaturverteilung auf der Oberfläche schnell angestromter unbeheizter Körper. *Forsch. Geb. Ing. Wesen*, 1942, vol. 13, pp. 246–254.
- [2] Aleksyuk A.I. The Eckert–Weise effect and energy separation under the flow interference behind side-by-side cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, vol. 915, art. A95. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.128>

Неоднозначные режимы сверхзвукового обтекания осесимметричных каверн под углами атаки

М.М. Симоненко

sim1950@mail.ru

С.В. Гувернюк

А.Ф. Зубков

НИИ механики МГУ, Москва, Россия

Проведены экспериментальные исследования сверхзвукового обтекания осесимметричных кольцевых каверн на цилиндроконических телах под углами атаки. В широком диапазоне изменения определяющих параметров (относительная протяженность каверны, угол атаки, число Маха) наблюдались однозначные и неоднозначные режимы обтекания каверны. В зависимости от текущего состояния (открытая или замкнутая каверна) при изменении определяющих параметров возможно обратимое (гистерезис) и необратимое переключение режима обтекания каверны.

Ключевые слова: кольцевая каверна, сверхзвуковой поток, угол атаки, отрыв потока, гистерезис

Конструктивные элементы в виде кольцевых каверн (выемок, вырезов) на поверхности тел вращения часто встречаются в объектах аэрокосмической и авиационной техники. Изучение механизмов взаимодействия сверхзвукового потока газа с отрывными структурами, возникающими в кавернах, представляет собой важную практическую задачу. В ряде случаев режимы сверхзвукового обтекания каверн неоднозначны и наблюдается параметрический гистерезис. Конкретный режим обтекания каверны в области гистерезиса зависит от предыстории изменения варьируемых параметров, в частности, относительной протяженности каверны, угла атаки, числа Маха. Сведения об условиях возникновения неоднозначных режимов обтекания каверн важны, например, при разработке систем управления техническими объектами.

Рассматривается сверхзвуковое обтекание осесимметричных цилиндроконических тел вращения с кольцевой каверной прямоугольного осевого сечения длиной L и глубиной h . В зависимости от соотношения L/h возможны два различных режима течения в каверне [1]. Если L/h меньше некоторого L_o/h , реализуется открытая каверна (o — open). В этом случае в полости каверны образуется единая область отрыва, отделенная от внешнего сверхзву-

кового потока слоем смешения. Если L/h превышает некоторое критическое значение L_c/h ($L_c > L_o$), реализуется замкнутая каверна (c — closed). При этом в полости каверны образуются две изолированные области отрыва, одна — за передним, другая — перед задним уступом каверны. Промежуточный диапазон $L_o/h < L/h < L_c/h$ отвечает области гистерезиса (h — hysteresis). В области H возможны режимы течения как с открытой, так и с замкнутой кавернами. При непрерывном увеличении L первоначально открытая каверна ($L < L_o$) замыкалась при достижении соответствующего $L = L_c$, а при последующем непрерывном уменьшении L замкнутая каверна ($L > L_c$) открывалась при достижении соответствующего $L = L_o$.

В кольцевой каверне на осесимметричном теле, обтекаемом сверхзвуковым потоком под углом атаки, реализуются более сложные трехмерные структуры течения [2]. В области гистерезиса H под углом атаки α могут существовать режимы течения с замкнутой и с открытой каверной. При увеличении угла атаки первоначально замкнутая (при $\alpha = 0$) каверна необратимо открывалась при некотором α и оставалась открытой при любых последующих изменениях угла атаки и возврате тела в исходное положение (при $\alpha = 0$). Открытие каверны сопровождалось скачкообразным уменьшением сопротивления тела.

Границы области гистерезиса зависят от угла атаки [3]. Для одной из возможных конфигураций цилиндриконического тела с кольцевой каверной в параметрической плоскости ($\alpha, L/h$) экспериментально определены верхняя L_c и нижняя L_o границы области гистерезиса H . С практической точки зрения параметрический гистерезис интересен тем, что может оказывать значительное влияние на статические и нестационарные аэродинамические характеристики при полете тел, в частности, влиять на устойчивость колебаний тел под углом атаки.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований сверхзвукового обтекания осесимметричных кольцевых каверн на цилиндриконических телах под углами атаки. Общий вид экспериментальной модели показан на рис. 1. Экспериментальная модель включает цилиндрический корпус 1, выдвижной цилиндрический стержень 2, установленную на стержне цилиндрическую проставку 3 и конический наконечник 4. Здесь D — диаметр корпуса 1 и проставки 3, d — диаметр выдвижного стержня 2, S — длина проставки 3, β — угол полураствора конического наконечника 4, $h = (D - d)/2$ — глубина каверны, L — длина каверны.

Геометрические параметры модели: $D = 45$ мм, $d = 29$ мм, $h = 8$ мм, $L = 56 \dots 160$ мм, $S = 0; 30; 60$ и 90 мм, $\beta = 10, 20$ и 30° .

Исследования проведены в аэродинамических трубах А-7 и А-8 НИИ механики МГУ при числах Маха $M=1.78, 2.5$ и 3 . Рабочая среда — воздух с температурой торможения $270 \dots 275$ К. Для выявления неоднозначных режимов обтекания использовалась технология непрерывного изменения

в сверхзвуковом потоке протяженности каверны L и угла атаки α . В ходе экспериментов регистрировалось давление на поверхности неподвижного заднего уступа каверны. Осуществлялась также видеорегистрация шлирен-изображений картин течения.

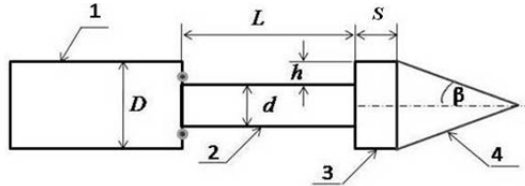


Рис. 1. Схема экспериментальной модели:
1 — корпус; 2 — выдвижной стержень;
3 — проточка; 4 — конический наконечник

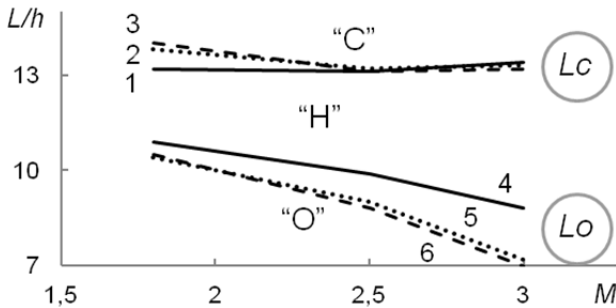


Рис. 2. Влияние числа Маха на границы области гистерезиса при $\alpha = 0^\circ, S = 0$: 1,4 — $\beta = 10^\circ$; 2,5 — 20° ; 3,6 — 30°

Влияние числа Маха на верхнюю L_c и нижнюю L_o границы области гистерезиса при $\alpha = 0^\circ, S = 0$ и $\beta = \text{var}$ иллюстрирует график рис. 2. Пары теневых картин структуры течения при различных L/h , полученные при непрерывном увеличении (верхний ряд) и непрерывном уменьшении (нижний ряд) протяженности каверны представлены на рис. 3. В рассмотренном случае осесимметричного обтекания границы гистерезиса были: $L_o/h = 10,2, L_c/h = 13,8$.

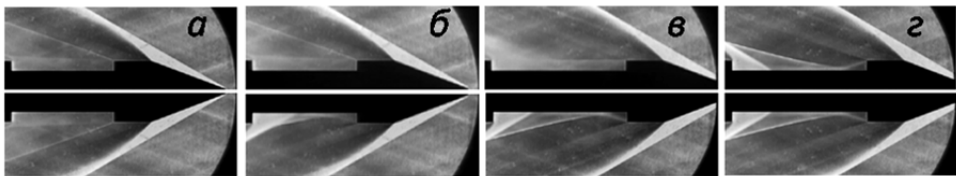


Рис. 3. Эволюция структуры осесимметричного обтекания кольцевой каверны при непрерывном увеличении (вверху, а-г) и последующем уменьшении (внизу, г-а) протяженности каверны, $\alpha = 0^\circ, M = 3, \beta = 20^\circ, S = 30$ мм: а — $L/h = 10,2$; б — $10,3$; в — $13,7$; г — $13,8$

Неоднозначные режимы обтекания каверны наблюдались в широком диапазоне изменения определяющих параметров (L/h , α , M). В зависимости от текущего состояния (открытая или замкнутая каверна) при изменении определяющих параметров возможно обратимое (гистерезис) и необратимое переключение режима обтекания каверны.

Литература

- [1] Гувернюк С.В., Зубков А.Ф., Симоненко М.М. Экспериментальное исследование сверхзвукового обтекания осесимметричной кольцевой каверны. *Инженерно-физический журнал*, 2016, т. 89, № 3, с. 670–679.
- [2] Гувернюк С.В., Зубков А.Ф., Симоненко М.М., Швец А.И. Экспериментальное исследование трехмерного сверхзвукового обтекания осесимметричного тела с кольцевой каверной. *Известия РАН. Механика жидкости и газа*, 2014, № 4, с. 136–142.
- [3] Guvernuyuk S., Simonenko M., Zubkov A. Experimental study of supersonic flow around an axisymmetric annular cavity at angles of attack. *Acta Astronautica*, 2021, vol. 180, pp. 693–700. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.01.013>

Ambiguous Modes of Supersonic Flow around Axisymmetric Cavities at Angles of Attack

M.M. Simonenko sim1950@mail.ru

S.V. Guvernuyuk

A.F. Zubkov

Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Experimental studies of supersonic flow around axisymmetric annular cavities on cylindrical-conical bodies at angles of attack have been carried out. In a wide range of changes in the determining parameters (relative cavity length, attack angle, Mach number), unambiguous and ambiguous modes of flow around the cavity were observed. Depending on the current state (open or closed cavity), when changing the defining parameters, reversible (hysteresis) and irreversible switching of the flow in the cavity is possible.

Keywords: annular cavity, supersonic flow, angle of attack, separation flow, hysteresis

References

- [1] Guvernuyuk S.V., Zubkov A.F., Simonenko M.M. Experimental investigation of the supersonic flow over an axisymmetric ring cavity. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, vol. 89, no. 3, pp.678–687. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1426-4>
- [2] Guvernuyuk S.V., Zubkov A.F., Simonenko M.M., Shvets A.I., Experimental investigation of three-dimensional supersonic flow past an axisymmetric body with an annular cavity. *Fluid Dynamics*, 2014, vol. 49, no. 4, pp. 540–546. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0015462814040140>
- [3] Guvernuyuk S., Simonenko M., Zubkov A. Experimental study of supersonic flow around an axisymmetric annular cavity at angles of attack. *Acta Astronautica*, 2021, vol. 180, pp. 693–700. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.01.013>

Эффект вязкой коротковолновой отсечки для стоячих поверхностных гравитационных волн

В.А. Калиниченко

kalin@ipmnet.ru

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

Обсуждаются результаты экспериментов по изучению влияния вязкости на параметры стоячих поверхностных волн в вертикально колеблющемся прямоугольном сосуде. Показано, что увеличение вязкости рабочей среды существенно изменяет динамику волновой моды — наблюдается регуляризация волны при полном подавлении механизмов разрушения. Обобщены теоретические и численные результаты анализа дисперсионного уравнения стоячих волн на поверхности вязкой жидкости, опубликованные Л.Н. Сретенским в 1941 г. Предложен механизм вязкой регуляризации волнового движения, согласно которому наблюдаемые в эксперименте эффекты связаны с наличием области коротковолновой отсечки, где вязкая диссипация становится доминирующим фактором и происходит подавление коротковолновых возмущений, ответственных за разрушение стоячей волны.

Ключевые слова: регулярные, нерегулярные и разрушающиеся волны, вязкая жидкость, дисперсионное уравнение, затухающие колебания

*Работа выполнена по теме государственного задания
№ АААА-А20-120011690131-7.*

Viscous Shortwave Cutoff Effect for Standing Surface Gravity Waves

V.A. Kalinichenko

kalin@ipmnet.ru

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

The results of experiments on studying the effect of viscosity on the parameters of standing surface waves in a vertically oscillating rectangular vessel are discussed. It is shown that a increase in the viscosity of the working medium significantly changes the dynamics of the wave mode — wave regularization is observed with complete suppression of the breaking mechanisms. Theoretical and numerical results of the analysis of the dispersion equation of standing waves on the surface of a viscous liquid, published by L.N. Sretensky in 1941. A mechanism was proposed for viscous regularization of wave motion, according to which the effects observed in the experiment are associated with the presence of a short-wavelength cutoff region, where viscous dissipation becomes the dominant factor and short-wavelength perturbations responsible for the destruction of a standing wave are suppressed.

Keywords: regular, irregular and breaking waves, viscous liquid, dispersion equation, damped oscillations

*The work was supported by the State Program
no. АААА-А20-120011690131-7.*

Волновая динамика стратифицированных сред с фоновыми сдвиговыми течениями

В.В. Булатов

internalwave@mail.ru

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

Решена задача о генерации внутренних гравитационных волн в океане с реальными и модельными распределениями частоты плавучести и фонового сдвигового течения. Для реальных и модельных распределений частоты плавучести и фоновых сдвиговых течений приведены результаты численных расчетов амплитудно-фазовых характеристик волновых полей. Численно изучена трансформация амплитудно-фазовых картин полей внутренних гравитационных волн в зависимости от параметров генерации. Показано, что пространственная изменчивость направления распространения волновых пакетов может приводить к достаточно заметной вертикальной амплитудной перестройке собственных функций. Использование модельных представлений для основных гидрологических характеристик (частоты плавучести и фоновых сдвиговых течений) позволяют упростить основную спектральную задачу. Показано, что модельные представления гидрологических характеристик дают возможность качественно верно описать основные особенности дисперсионных поверхностей и фазовых структур волновых полей.

Ключевые слова: внутренние гравитационные волны, стратифицированная среда, сдвиговые течения

В реальных океанических условиях вертикальная и горизонтальная динамика фоновых сдвиговых течений в значительной степени связана с внутренними гравитационными волнами (ВГВ). В океане такие течения могут проявляться, например, в области сезонного термоклина и оказывать заметное влияние на динамику ВГВ. Обычно предполагается, что фоновые течения с вертикальным сдвигом скорости слабо зависят от времени и горизонтальных координат. Если масштаб изменения течений по горизонтали много больше длин ВГВ, а масштаб временной изменчивости много больше периодов ВГВ, то такие течения можно рассматривать как стационарные и горизонтально однородные. Для исследования механизма взаимовлияния течений и ВГВ можно рассматривать различные модельные представления для стратификации и сдвиговых течений. Синтез численных, аналитических и асимптотических результатов может дать первоначальное качественное и количественные представления о волновых океанических процессах с учетом фоновых сдвиговых течений.

Асимптотические решения требуют верификации полученных аналитических результатов, оценки границ их применимости, поэтому сравнение численных и асимптотических результатов представляет особый интерес для исследования динамики ВГВ в океане с течениями. Метод Фурье является одним из основных методов решения задач волновой динамики ВГВ в океане с произвольными фоновыми сдвиговыми течениями. Полученные с помощью этого метода интегральные представления решений, требуют численного

и асимптотического анализа. Методы прямого численного моделирования не всегда эффективны для исследования генерации ВГВ произвольными не-локальными и нестационарными источниками возмущений, особенно с учетом изменчивости основных гидрологических параметров, и требуют верификации и сравнения с решениями модельных задач. Поэтому при анализе динамики ВГВ в реальном океане необходимо использовать комбинацию, численных, асимптотических и аналитических методов.

Целью настоящей работы является численное исследование амплитудно-фазовой структур ВГВ в океане конечной глубины с фоновыми сдвиговыми течениями для произвольных и модельных вертикальных распределений частоты плавучести и скоростей фоновых сдвиговых течений. В работе получены численные решения, которые описывают основные амплитудно-фазовые характеристики полей ВГВ в океане конечной глубины, как для произвольных, так и модельных распределений частоты плавучести и фоновых сдвиговых течений. В общем случае решение дисперсионного уравнения и качественный анализ получаемых дисперсионных соотношений и амплитудных зависимостей собственных функций представляет значительную математическую трудность.

Для аналитического решения задачи можно использовать модельные представления основных гидрологических параметров: постоянное распределение частоты плавучести и линейные зависимости фонового сдвигового течения от глубины. Использование модельных представлений для основных гидрологических характеристик (частоты плавучести и фоновых сдвиговых течений) позволят редуцировать основную спектральную задачу к более простой, а также исследовать эту упрощенную задачу аналитически. Аналитические и численные результаты показывают, что асимптотические конструкции, использующие модельные представления частоты плавучести и фоновых сдвиговых скоростей качественно верно могут описывать амплитудно-фазовую структуру ВГВ. Численные расчеты показывают, что учет реальных распределений основных гидрологических параметров океана дает возможность изучить все многообразие генерируемых волн.

Изменение основных параметров волновой генерации вызывает заметную качественную перестройку фазовых картин возбуждаемых полей ВГВ, связанную с трансформацией дисперсионных зависимостей и вертикальной структуры волновых полей. Численные расчеты показывают, что модельные представления гидрологических характеристик качественно верно описывают основные особенности дисперсионных поверхностей. В то же время, для корректного описания амплитудных зависимостей ВГВ в океане с фоновыми сдвиговыми необходимо использовать численные методы. В частности, численные расчеты для реальных гидрологических параметров показали, что относительно коротковолновые пакеты ВГВ могут концентрироваться на глубинах, где имеются экстремумы функции, зависящей от компонент волнового вектора и вектора сдвиговых течений.

Аналитические приближения дают возможность решать более сложные задачи волновой динамики стратифицированных сред. Построенные асимптотики дисперсионных соотношений в дальнейшем позволяют исследовать более реалистичную задачу изучения динамики ВГВ в океане медленноменяющимися и нестационарными параметрами. В этом случае решение можно представить в виде суммы волновых пакетов, фазовая структура которых определяется аналитическими свойствами соответствующих дисперсионных зависимостей. Конкретный выбор фазовой функции (модельных интегралов) полностью определяется аналитическими свойствами дисперсионных соотношений, зависящих от реальной гидрологии океана. Аналитические выражения дисперсионных кривых могут использоваться, в частности, для качественной интерпретации наблюдаемых волновых явлений в океане. Также полученные аналитические результаты могут быть использованы для разработки дистанционных методов обнаружения ВГВ методами радиолокации.

Работа выполнена по теме государственного задания

№ АААА-А20-120011690131-7

и частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-01-00111А).

Wave Dynamics of Stratified Medium with Shear Flows

V.V. Bulatov

internalwave@mail.ru

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

The problem of generation of internal gravity waves in the ocean with real and model distributions of the buoyancy frequency and background shear current is solved. For real and model distributions of the buoyancy frequency and background shear currents, the results of numerical calculations of the amplitude-phase characteristics of wave fields are presented. The transformation of the amplitude-phase patterns of the fields of internal gravitational waves is numerically studied depending on the generation parameters. It is shown that the spatial variability of the direction of propagation of wave packets can lead to a rather noticeable vertical amplitude rearrangement of the eigenfunctions. The use of model representations for the main hydrological characteristics (frequencies of buoyancy and background shear currents) makes it possible to simplify the main spectral problem. It is shown that model representations of hydrological characteristics make it possible to qualitatively correctly describe the main features of dispersion surfaces and phase structures of wave fields.

Keywords: internal gravity waves, stratified medium, shear flows

In real oceanic conditions, the vertical and horizontal dynamics of background shear currents is largely related to internal gravity waves (IGWs). In the ocean, such currents can manifest themselves, for example, in the region of the seasonal thermocline and have a noticeable effect on the IGW dynamics. It is usually assumed that background flows with a vertical velocity shear depend weakly on time

and horizontal coordinates. If the scale of changes in currents horizontally is much greater than the lengths of IGWs, and the scale of temporal variability is much greater than periods of IGWs, then such flows can be considered as stationary and horizontally homogeneous. To study the mechanism of mutual influence of currents and IGW, one can consider various model representations for stratification and shear currents. The synthesis of numerical, analytical, and asymptotic results can give initial qualitative and quantitative ideas about oceanic wave processes, taking into account background shear currents.

Asymptotic solutions require verification of the obtained analytical results and assessment of the limits of their applicability; therefore, comparison of numerical and asymptotic results is of particular interest for studying the dynamics of IGWs in an ocean with currents. The Fourier method is one of the main methods for solving problems of IGW wave dynamics in the ocean with arbitrary background shear currents. The integral representations of solutions obtained using this method require numerical and asymptotic analysis. Methods of direct numerical modeling are not always effective for studying the generation of IGWs by arbitrary non-local and non-stationary sources of disturbances, especially taking into account the variability of the main hydrological parameters, and require verification and comparison with the solutions of model problems. Therefore, when analyzing the IGW dynamics in a real ocean, it is necessary to use a combination of numerical, asymptotic, and analytical methods.

The aim of this work is to numerically study the amplitude-phase structures of IGWs in an ocean of finite depth with background shear currents for arbitrary and model vertical distributions of the buoyancy frequency and velocities of background shear currents. Numerical solutions have been obtained in this work that describe the main amplitude-phase characteristics of IGW fields in an ocean of finite depth, both for arbitrary and model distributions of the buoyancy frequency and background shear currents. In the general case, the solution of the dispersion equation and the qualitative analysis of the resulting dispersion relations and amplitude dependences of the eigenfunctions present a significant mathematical difficulty. For an analytical solution of the problem, one can use model representations of the main hydrological parameters: a constant distribution of the buoyancy frequency and linear dependences of the background shear current on depth. The use of model representations for the main hydrological characteristics (buoyancy frequency and background shear currents) will make it possible to reduce the main spectral problem to a simpler one, as well as to study this simplified problem analytically. Analytical and numerical results show that asymptotic constructions using model representations of the buoyancy frequency and background shear velocities can qualitatively correctly describe the amplitude-phase structure of IGWs. Numerical calculations show that taking into account the real distributions of the main hydrological parameters of the ocean makes it possible to study the whole variety of generated waves.

A change in the main parameters of wave generation causes a noticeable qualitative rearrangement of the phase patterns of the excited IGW fields, which is

associated with the transformation of the dispersion dependences and the vertical structure of the wave fields. Numerical calculations show that model representations of hydrological characteristics qualitatively correctly describe the main features of dispersion surfaces. At the same time, for a correct description of the amplitude dependences of IGWs in the ocean with background shear, it is necessary to use numerical methods. In particular, numerical calculations for real hydrological parameters have shown that relatively short-wavelength IGW packets can concentrate at depths where there are extrema of the function depending on the components of the wave vector and the shear current vector.

Analytical approximations make it possible to solve more complex problems of the wave dynamics of stratified media. The constructed asymptotics of the dispersion relations in the future allow us to study a more realistic problem of studying the dynamics of IGWs in the ocean with slowly varying and nonstationary parameters. In this case, the solution can be represented as a sum of wave packets whose phase structure is determined by the analytical properties of the corresponding dispersion dependences. The specific choice of the phase function (model integrals) is completely determined by the analytical properties of the dispersion relations, which depend on the actual hydrology of the ocean. Analytical expressions for dispersion curves can be used, in particular, for a qualitative interpretation of the observed wave phenomena in the ocean. Also, the obtained analytical results can be used to develop remote methods for detecting IGW by radar methods.

*This work was supported by state program №АААА-А20-120011690131-7
and the grant RFBR №20-01-00111А.*

О возможности улучшения качества изображения при дистанционном зондировании водных сред

В.В. Булатов¹

А.Н. Пономарев²

holodel@yandex.ru

¹ **Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия**

² **МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия**

Лидары на основе твердотельных лазеров с диодной накачкой находят широкое применение при дистанционном мониторинге земной поверхности и водных сред. Добавление в измерительные системы устройства, использующее вынужденное рассеяние Мандельштама — Бриллюэна, для коррекции искажений волнового фронта, возникающих при прохождении через неоднородную среду, дает возможность улучшить качество получаемого изображения при обработке волнового сигнала в реальном времени. В работе теоретически изучено влияние спонтанного рассеяния на основные характеристики параметрического возбуждения для случая многократного пересечения излучения накачки с сигнальной волной. Дана оценка уширению параметрической генерации и влиянию возбуждения необращенной волны при вынуж-

денном рассеянии Мандельштама — Бриллюэна на чувствительность устройства. Полученные результаты могут быть использованы для улучшения качества изображений при дистанционном зондировании водной поверхности с использованием лазерных систем обнаружения.

Ключевые слова: водная поверхность, дистанционное зондирование, лазерная локация

В настоящее время являются актуальными задачи, предполагающие осуществление непрерывного дистанционного мониторинга состояния водной среды и таких объектов, как морские платформы и другие технологические конструкции, позволяющие в течении продолжительного времени контролировать их параметры с целью предотвращения техногенных катастроф. Для решения этой проблемы широко используются различные лидарные системы. Применение современных твердотельных лазеров с диодной накачкой открывают широкие перспективы для информационно-измерительных систем сбора данных по измерению распределения физических величин в водном пространстве, в том числе решения проблем оперативного дистанционного зондирования морской поверхности. Отметим, что наиболее перспективными методами контроля морских акваторий с целью обнаружения загрязнений на поверхности воды являются методы, основанные на активной лазерной локации или радиолокации водной поверхности. В этом случае не требуется естественного освещения и поэтому указанные системы могут использоваться в широком диапазоне атмосферных условий независимо от времени суток. Лидарные системы также обладают высокой пространственно-угловой разрешающей способностью, возможностью спектральной фильтрации и временного стробирования полезного сигнала на фоне помех.

Указанные свойства лидаров делают возможным проводить исследования расположенных в толще воды различных объектов в зависимости от первичных гидрооптических характеристик, состояния взволнованной поверхности воды, проводить зондирование стратифицированной толщи морской воды с целью определения параметров стратификации первичных гидрооптических характеристик, определять параметры светорассеивающих слоев воды, регистрировать поверхностные и внутренние гравитационные волны, оценивать их характеристики. Импульсная характеристика лидара определяет пространственное разрешение лидарных измерений в зависимости от дальности, а также точность определения расстояния до обследуемых объектов. Данная характеристика является сверткой зондирующего лазерного импульса с импульсной характеристикой приемно-регистрирующей оптической системы. Современные достижения в производстве компактных твердотельных лазеров с диодной накачкой способствует стремительному развитию оптических технологий в лазерной локации земной поверхности и водных сред.

При прохождении световой волны в природных средах (атмосфера, океан) в силу оптической неоднородности образуются искажения волнового фронта. Для устранения искажений разрабатываются различные специальные

оптические системы, включающие твердотельный лазер, приемник излучения, регистрирующий световые волны, устройство коррекции волнового фронта и систему управления. Один из методов восстановления искажений волнового фронта основан на использовании эффекта обращения волнового фронта. Обращенный волновой фронт будет обратным по отношению к искаженному первичному лучу, и в результате наложения двух фронтов можно восстановить исходное изображение. Лазерное излучение после прохождения через неоднородную среду превращается в искаженное пятно, изменяющееся со временем. Отражаясь от объекта, оно еще сильнее искажается и может накладывать серьезные ограничения на точность измерений. В случае же использования обращения волнового фронта, отраженного от объекта, излучения, направляемого обратно по тому же самому пути, при отсутствии значительных изменений условий прохождения луча за это время происходит восстановление качества пятна на объекте.

Поэтому для решения задачи исправления или восстановления волнового фронта в сложных информационных системах, требующих получения оптического изображения высокого разрешения и качества, необходимо разрабатывать соответствующие оптические устройства, способные делать компенсацию указанных искажений в режиме реального времени. В силу последнего обстоятельства в данном случае может быть использовано явление обращения волнового фронта, использующее вынужденное рассеяние Мандельштама — Бриллюэна, которое обладает малой инерционностью, удовлетворяющей поставленным требованиям.

Показано, что в случае параметрического рассеяния Мандельштама — Бриллюэна в пересекающихся световых пучках можно получить высокую эффективность отражения, что имеет большое значение в случае приема слабых оптических сигналов. Применение в лидарных системах дополнительного устройства на основе параметрического вынужденного рассеяния Мандельштама — Бриллюэна, способного работать со слабыми отраженными сигналами дает возможность получения изображения более высокого качества. Использование многократного пересечения излучения накачки с сигнальной волной позволяет значительно усилить отраженный оптический сигнал, что открывает перспективы разработки и программной реализации эффективных алгоритмов, использующих лазерную локацию для детектирования особенностей природных сред на достаточно больших расстояниях. Полученные результаты могут быть использованы для улучшения качества изображений при дистанционном зондировании земной и водной поверхностей с использованием лазерных систем обнаружения.

*Работа выполнена по теме государственного задания
№ АААА-А20-120011690131-7 (В.В. Булатов).*

On the Possibility of Improving Image Quality in Remote Sensing of Aquatic Environments

V.V. Bulatov¹

holodel@yandex.ru

A.N. Ponomarev²

¹Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

²BMSTU, Moscow, Russia

Lidars based on diode-pumped solid-state lasers are widely used in remote monitoring of the earth's surface and water environments. The addition of a device that uses stimulated Mandelstam-Brillouin scattering to the measuring systems to correct wavefront distortions that occur when passing through an inhomogeneous medium makes it possible to improve the quality of the resulting image when processing a wave signal in real time. The influence of spontaneous scattering on the main characteristics of parametric excitation is theoretically studied for the case of multiple intersections of pump radiation with a signal wave. An estimate is given for the broadening of parametric generation and the effect of excitation of a nonreversed wave in stimulated Mandelstam — Brillouin scattering on the sensitivity of the device. The results obtained can be used to improve the quality of images in remote sensing of the water surface using laser detection systems.

Keywords: water surface, remote sensing, laser location

At present, the tasks that involve the implementation of continuous remote monitoring of the state of the aquatic environment and such objects as offshore platforms and other technological structures are relevant, allowing for a long time to control their parameters in order to prevent man-made disasters. Various lidar systems are widely used to solve this problem. The use of modern diode-pumped solid-state lasers opens up broad prospects for information-measuring data collection systems for measuring the distribution of physical quantities in the water space, including solving problems of operational remote sensing of the sea surface. Note that the most promising methods for monitoring marine areas in order to detect pollution on the water surface are methods based on active laser ranging or radar of the water surface. In this case, natural light is not required and therefore these systems can be used in a wide range of atmospheric conditions regardless of the time of day. Lidar systems also have a high spatial-angular resolution, the possibility of spectral filtering and temporal gating of the useful signal against the background of noise.

These properties of lidars make it possible to study various objects located in the water column, depending on the primary hydrooptical characteristics, the state of the rough water surface, to carry out sounding of the stratified seawater column in order to determine the parameters of the stratification of primary hydrooptical characteristics, to determine the parameters of light-scattering layers of water, to register surface and internal gravitational waves, evaluate their characteristics. The impulse response of a lidar determines the spatial resolution of lidar measurements depending on the range, as well as the accuracy of determining the distance to the

surveyed objects. This characteristic is a convolution of the probing laser pulse with the impulse response of the receiving-recording optical system. Modern achievements in the production of compact diode-pumped solid-state lasers contribute to the rapid development of optical technologies in laser ranging of the earth's surface and water environments.

During the passage of a light wave in natural media (atmosphere, ocean), due to optical inhomogeneity, distortions of the wave front are formed. To eliminate distortions, various special optical systems are being developed, including a solid-state laser, a radiation detector that detects light waves, a wavefront correction device, and a control system. One of the methods for reconstructing wavefront distortions is based on the use of the wavefront reversal effect. The reversed wavefront will be the reverse of the distorted primary beam, and as a result of the superposition of the two fronts, the original image can be restored. After passing through an inhomogeneous medium, laser radiation turns into a distorted spot that changes with time. Reflected from the object, it is even more distorted and can impose serious restrictions on the accuracy of measurements. In the case of using the conjugation of the wavefront reflected from the object, the radiation directed back along the same path, in the absence of significant changes in the conditions for the passage of the beam during this time, the quality of the spot on the object is restored.

Therefore, to solve the problem of correcting or restoring the wavefront in complex information systems that require obtaining a high-resolution and high-quality optical image, it is necessary to develop appropriate optical devices capable of compensating for these distortions in real time. Due to the latter circumstance, in this case, the phenomenon of wave front reversal can be used, using stimulated Mandelstam — Brillouin scattering, which has a low inertia that satisfies the set requirements.

It is shown that in the case of parametric Mandelstam — Brillouin scattering in intersecting light beams, a high reflection efficiency can be obtained, which is of great importance in the case of receiving weak optical signals. The use in lidar systems of an additional device based on parametric stimulated Mandelstam-Brillouin scattering capable of working with weak reflected signals makes it possible to obtain a higher quality image. The use of multiple intersections of pump radiation with a signal wave makes it possible to significantly amplify the reflected optical signal, which opens up prospects for the development and software implementation of efficient algorithms that use laser ranging to detect features of natural media at sufficiently large distances. The results obtained can be used to improve the quality of images in remote sensing of land and water surfaces using laser detection systems.

*This work was supported by state program
No. AAAA-A20-120011690131-7 (V.V. Bulatov).*

Динамика и разрушение капли воды при ударе о твердое препятствие

А.Н. Рожков

rozhkov@ipmnet.ru

А.И. Федюшкин

fai@ipmnet.ru

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

Работа посвящена исследованию деформации и фрагментации капель жидкости при их столкновении с масками и фильтрами, защищающими от зараженных капель воздуха. Кашель и чихание вызывают выброс капель слюны и бронхиальной слизи. Многие вирусы, в том числе COVID-19, живут только в жидкой среде, поэтому актуально исследование динамики и фрагментации капель. В данной работе экспериментально и численно локально столкновение капли с маской или фильтром моделируется ударом капли о небольшое препятствие. Исследования позволяют качественно проследить фрагментацию ротовой и бронхиальной жидкостей и их превращение в количество мельчайших капель, распространяющих инфекцию в воздухе. В реальности зараженные капли падают на маски и фильтры при примерно таких же числах Вебера, что и в данном исследовании.

Ключевые слова: капля, всплеск, вирус

Столкновение капли с диском. Фрагментация капли и образование мелких вторичных капель прослежено на примере столкновения капли воды с препятствием в виде диска [1, 2]. При столкновении капли с дискообразным препятствием формируется всплеск, образованный тонкой круглой жидкой ламеллой, ограниченной круглой краевой струей (рис. 1, 2). Всплеск сначала расширяется (диаметр краевой струи d увеличивается), а затем схлопывается, как показано на рис 2, 3а. На краевой струе растут возмущения, которые преобразуются в жидкие пальцы. При увеличении скорости удара v_i жидкие пальцы начинают распадаться на вторичные капли, которые являются потенциальными переносчиками инфекции. Образование капель (разбрызгивание) происходит, как при расширении всплеска, так и при его сжатии, а вторичные капли могут двигаться как от препятствия, так и в направлении препятствия.

На рис. 3 показаны траектории краевых струй $d(t)$ для различных высот падения капель h . Здесь же представлены зависимости максимального диаметра всплеска d_{\max} от ударного числа Вебера $We_i = \rho v_i^2 d_i / \gamma$ (использованы стандартные обозначения). Данные экспериментов свидетельствуют, что переход к разрушению всплеска происходит в интервале чисел Вебера $We_i \in (137, 206)$. На рис. 3, а и б крестиками отмечены точки, соответствующие разрушению всплеска с образованием вторичных капель.

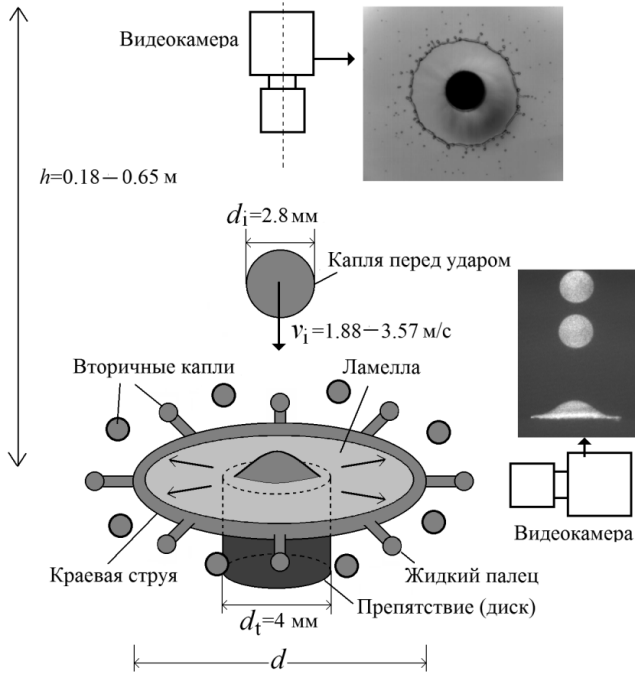


Рис. 1. Схема столкновения капли воды диаметром $d_i=2,8$ мм с дискообразной мишенью диаметром $d_t=4$ мм для различных высот падения капель h . Капли имеют скорость удара $v_i=1,88; 2,30; 2,62$ и $3,57$ м/с ($We_i=137, 206, 267$ и 496)

Время	$h = 0,18$ м ($v_i = 1,88$ м/с, $We_i = 137$)	$h = 0,27$ м ($v_i = 2,30$ м/с, $We_i = 206$)	$h = 0,35$ м ($v_i = 2,62$ м/с, $We_i = 267$)	$h = 0,65$ м ($v_i = 3,57$ м/с, $We_i = 496$)
1 мс				
3 мс				
5 мс				

Рис. 2. Вид сверху на столкновение капли воды диаметром $d_i=2,8$ мм с дискообразной мишенью диаметром $d_t=4$ мм (черный круг) для различных высот падения капель h . Капли имеют скорость удара $v_i=1,88; 2,30; 2,62$ и $3,57$ м/с ($We_i=137, 206, 267$ и 496)

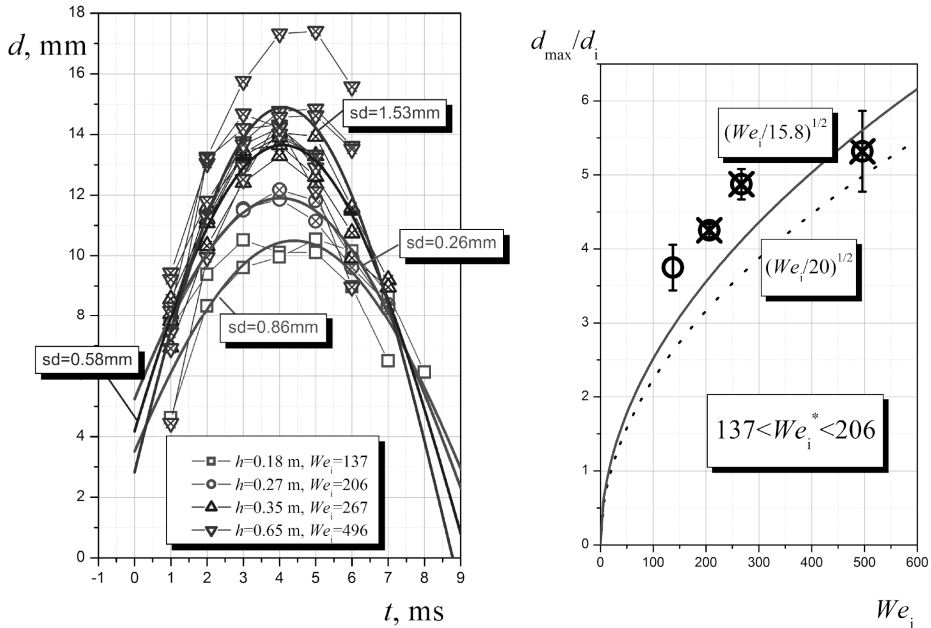


Рис. 3 (а) — диаметр всплеска d как функция времени t . Всплеск образуется в результате падения капли диаметром 2,8 мм с высоты h на дискообразную мишень; sd — стандартное отклонение экспериментальных точек от соответствующих аппроксимирующих кривых (утолщенные линии). (б) — отношение максимального диаметра всплеска d_{max} и начального диаметра капли $d_i = 2,8$ мм, как функция числа Вебера We_i [1, 2]

Численное моделирование. Характер растекания капли определяется соотношением и взаимодействием сил инерции и поверхностного натяжения [1]. Задача характеризуется безразмерными числами Рейнольдса $Re_i = \rho v_i d_i / \mu$ и числом Вебера $We_i = \rho v_i^2 d_i / \gamma$, где ρ — плотность, v_i — скорость падения капли, d_i — диаметр капли, μ — вязкость, и γ — коэффициент поверхностного натяжения. Для капель воды задавались следующие свойства: $\rho = 1000$ кг/м³ — плотность, $\mu = 1$ мПа · с и $\gamma = 0,072$ Н/м. Математическая модель основана на решении 2D и 3D-уравнений Навье — Стокса методом контрольных объемов для двухфазных жидкостных систем «воздух — жидкость» с использованием VOF метода. Подробнее математическая модель описана в работах авторов [3]. На рис. 4 представлены результаты 3D моделирования растекания капли воды. Для реальных ротовых и бронхиальных капель на водной основе типичного диаметра $d_i = 100$ мкм и скорости удара порядка $v_i = 10$ м/с число Вебера удара порядка $We_i = 139$. Следовательно, оценки свидетельствуют $We_i \gg 1$ и $Re_i \gg 1$. Поэтому столкновение контролируется исключительно инерцией и капиллярностью, в то время как влияние всех других факторов несущественно [1]. Численные результаты предсказывают разбрызгивание в диапазоне чисел Вебера $We_i \in (137, 206)$ в соответствии с результатами экспериментов и оценками натуральных условий.

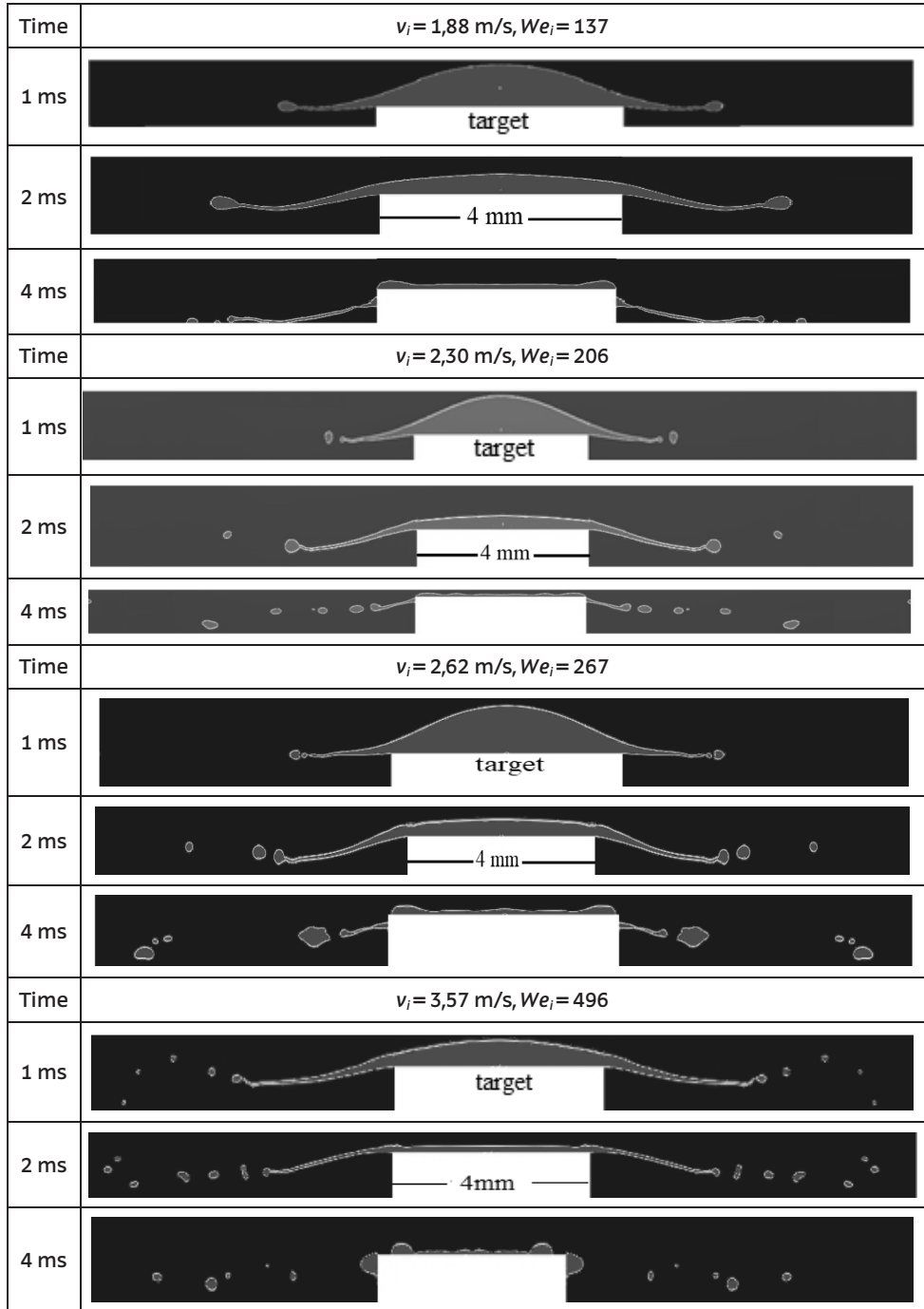


Рис. 4. Распределение фракции воды при столкновении капли $d_i = 2,8 \text{ мм}$ с диском $d_t = 4 \text{ мм}$ для разных скоростей удара v_i и моментов времени

Заключение. Результаты исследования показали, что распространение инфекции может происходить из-за распада капель при ударе о твердые препятствия в реальных природных условиях (*in situ*). Переход к разбрызгиванию капли жидкости на вторичные капли происходит при числах Вебера $We_i > We_i^*$, где $We_i^* \in (137, 206)$. Капли биологических жидкостей сталкиваются с материалом масок и фильтров примерно с одинаковыми числами Вебера $We_i^* \approx 100$. Таким образом, исследуемые процессы фрагментации капель в лабораторном эксперименте, и происходящие в реальности, имеют одни и те же механизмы. Данные исследования позволяют проследить физические особенности фрагментации ротовой и бронхиальной жидкостей и их превращение в большое количество мельчайших капель, распространяющих инфекцию в воздухе. Вместе с тем присущая ротовой жидкости упругость [4] может существенно замедлить процесс разрушения капли [5], поэтому полученные в настоящей работе численные данные следует рассматривать лишь как оценки «снизу» при сохранении выявленных общих тенденций.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 20-04-6012820 «Вирусы» и государственного задания № АААА-А17-117021310375-7.

Литература

- [1] Rozhkov A., Prunet-Foch B., Vignes-Adler M. Dynamics of a liquid lamella resulting from the impact of a water drop on a small target. *Proc R Soc Lond*, 2004, vol. A 460, pp. 2681–2704.
- [2] Федюшкин А.И., Рожков А.Н. Критерий растекания/разбрызгивания капли при ударе о твердую мишень. 7-я *Междунар. науч. конф. — школа молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах»*. Москва, ИПМех РАН, 2021, с. 230–233.
- [3] Федюшкин А.И., Рожков А.Н. Моделирование коалесценции капель. *Математическое моделирование и численные методы*, 2020, т. 26, № 2, с. 46–58.
- [4] Рожков А.Н. Упругость и релаксационные свойства ротовой жидкости. *Российский журнал биомеханики*, 2021, т. 25, № 4, с. 393–405.
- [5] Rozhkov A., Prunet-Foch B., Vignes-Adler M. Star-like breakup of polymeric drops in electrical field. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2015, vol. 226, pp. 46–59.

Dynamics and Breakup of a Water Drop upon Impact with a Solid Obstacle

A.N. Rozhkov

rozhkov@ipmnet.ru

A.I. Fedyushkin

fai@ipmnet.ru

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

The work is devoted to the study of deformation and fragmentation of liquid droplets when they collide with masks and filters that protect against contaminated air droplets. Coughing and sneezing cause droplets of saliva and bronchial mucus to be released. Many viruses,

including COVID-19, live only in a liquid medium, so it is important to study the dynamics and fragmentation of droplets. In this work, the local collision of a droplet with a mask or filter is experimentally and numerically simulated by the impact of a droplet on a small obstacle. The studies allow us to qualitatively trace the fragmentation of the oral and bronchial fluids and their transformation into the number of tiny droplets that spread the infection in the air. In reality, approximately the same values of the Weber number occur when infected droplets fall on masks and filters.

Keywords: drop, splash, virus

References

- [1] Rozhkov A., Prunet-Foch B., Vignes-Adler M. Dynamics of a liquid lamella resulting from the impact of a water drop on a small target. *Proc R Soc Lond*, 2004, vol. A 460, pp. 2681–2704.
- [2] Fedyushkin A.I., Rozhkov A.N. The criterion for the spreading/spraying of a drop upon impact with a solid target. *7th Intern. scientific conf. — School of Young Scientists “Physical and Mathematical Modeling of Processes in Geomedia”*. Moscow, IPMech RAS Publ., 2021, pp. 230–233. (In Russ.).
- [3] Fedyushkin A.I., Rozhkov A.N. Modeling of droplet coalescence. *Mathematical modeling and numerical methods*, 2020, vol. 26, no. 2, pp. 46–58. (In Russ.).
- [4] Rozhkov A.N. Elasticity and relaxation properties of the oral fluid. *Russian Journal of Biomechanics*, 2021, vol. 25, no. 4, pp. 393–405. (In Russ.).
- [5] Rozhkov A., Prunet-Foch B., Vignes-Adler M. Star-like breakup of polymeric drops in electrical field. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2015, vol. 226, pp. 46–59.

Влияние параметров генератора импульсных струй на эффективность его работы

В.В. Прокофьев

vlad.prokof@yandex.ru

С.А. Очеретяный

ocheret@imec.msu.ru

НИИ механики МГУ, Москва, Россия

Исследована зависимость безразмерных характеристик пульсаций давления в каверне от скорости течения (масштабный эффект) в диапазоне давлений напора от 0,05

до 0,4 МПа. Проведено сравнение с расчетами. Теория и эксперимент показывают эффект снижения относительных пульсаций давления в каверне с ростом напора. Однако теоретические зависимости выходят на горизонтальную асимптоту при напоре более 0,4 МПа. Экспериментальные данные также показывают, что выход на асимптоту имеет место. Впрочем, вопрос о работе генератора при больших напорах требует дальнейшего изучения.

Ключевые слова: струйное течение, каверна, отрицательное число кавитации, кавитационные автоколебания, пульсационные технологии

Исследования струйных течений жидкости в присутствии вентилируемой каверны показали, что при определенных условиях в такой гидравлической системе возникают кавитационные автоколебания с высокой интенсивностью пульсаций давления. Была показана принципиальная возможность использования режима автоколебаний для создания периодических импульсных струй при истечении из сужающегося сопла в атмосферу. Предложена схема гидравлической системы, включающая входное сопротивление — кавитатор, вентилируемую каверну и выходное сужающееся сопло, формирующее импульсные жидкие струи. В зависимости от поддува газа в каверну наблюдаются два пульсационных режима: каверна в процессе эволюции ограничена сечением кавитатора, и при увеличении поддува, появляются выбросы газа в область перед кавитатором. Проведены исследования интенсивности генерируемых струй и их дальности для этих режимов, а также влияние параметров сопла и кавитатора на области их существования. При фиксированном напоре жидкости исследовано влияние длины сопла на эффективность работы генератора. Причем длина сопла менялась как за счет изменения длины центрального (разгонного) участка перед сужающейся частью, так и за счет удлинения сопла за сужающуюся часть (коллиматор).

Influence of the Parameters of the Pulse Jet Generator on the Efficiency of Its Operation

V.V. Prokofiev

vlad.prokof@yandex.ru

S.A. Ocheretyaniy

ocheret@imec.msu.ru

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

The dependence of the dimensionless characteristics of pressure fluctuations in the cavity on the flow velocity (scale effect) in the head pressure range from 0.05 to 0.4 MPa was studied. Comparison with calculations is carried out. Theory and experiment show the effect of reducing the relative pressure fluctuations in the cavity with increasing pressure. However, the theoretical dependencies reach a horizontal asymptote at a pressure of more than 0.4 MPa. The experimental data also show that there is an asymptote approach. However, the question of the operation of the generator at high pressures requires further study.

Keywords: jet flow, cavity, negative cavitation number, cavitation self-oscillations, pulsating technologies

Studies of fluid jet flows in the presence of a ventilated cavity have shown that, under certain conditions, cavitation self-oscillations with a high intensity of pressure pulsations occur in such a hydraulic system. It was shown that it is possible in principle to use the self-oscillation regime to create periodic pulsed jets during outflow from a converging nozzle into the atmosphere. A scheme of a hydraulic system is proposed, including an input resistance — a cavitator, a ventilated cavity and an out-

put converging nozzle that forms pulsed liquid jets. Depending on the blowing of gas into the cavity, two pulsation regimes are observed: the cavity in the process of evolution is limited by the cross section of the cavitator, and with an increase in blowing, gas emissions appear in the area in front of the cavitator. The intensity of the generated jets and their range for these regimes were studied, as well as the influence of the nozzle and cavitator parameters on the areas of their existence. At a fixed liquid pressure, the influence of the nozzle length on the efficiency of the generator was studied. Moreover, the length of the nozzle was changed both by changing the length of the central (accelerator) section in front of the tapering part, and by lengthening the nozzle beyond the tapering part (collimator).

Использование релаксационных автоколебаний течений жидкости с ограниченной искусственной газовой каверной в вибрационных технологиях

П.М. Шкапов `spm@bmstu.ru`

И.Г. Благовещенский

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

На основе экспериментальных исследований с визуализацией и скоростной кино- и видеосъемкой предложена схематизация развитой ограниченной искусственной газовой каверны в потоке жидкости, положенная в основу ее математической модели. Получено дифференциальное уравнение с запаздывающим аргументом, описывающее динамику локального кавитационного образования. Вскрыты механизмы автоколебаний и релаксационных колебаний в рассматриваемой системе. Предложены способы использования пульсаций потока в вибрационных технологиях.

Ключевые слова: развитая ограниченная искусственная газовая каверна, визуализация, структура потока, математическая модель, автоколебания, вибрационные технологии

Литература

- [1] Шкапов П.М., Благовещенская М.М. Теоретические и прикладные вопросы динамики течений жидкости с ограниченной искусственной газовой каверной. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Естественные науки*, ч. 1, 2012, № 3, с. 109–114; ч. 2, 2012, № 4, с. 117–125.
- [2] Благовещенский И.Г., Гартиг Е.Б., Шкапов П.М. О гистерезисном характере развития автоколебаний в гидрوليнии с ограниченной искусственной газовой каверной на выходе. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2013, № 10.
- [3] Шкапов П.М. Автоколебания в гидросистемах с ограниченной искусственной газовой каверной в потоке жидкости. Тр. XII Всерос. съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. В 4 т. Уфа, 2019, т. 2, с. 263–264.
- [4] Кинелев В.Г., Шкапов П.М. *Способ очистки различных поверхностей изделий и устройство для его осуществления*. Пат. RU 2084296 C1 Российская Федерация, 20.07.1997.

The Use of Relaxation Self-Oscillations of Fluid Flows with a Limited Artificial Gas Cavity in Vibration Technologies

P.M. Shkapov spm@bmstu.ru

I.G. Blagoveshchensky¹

BMSTU, Moscow, Russia

Based on experimental studies with visualization and high-speed film and video shooting, a schematization of a developed limited artificial gas cavity in a liquid flow is proposed, which is the basis of its mathematical model. A differential equation with a lagging argument describing the dynamics of local cavitation formation is obtained. The mechanisms of self-oscillations and relaxation oscillations in the system under consideration are revealed. Methods of using flow pulsations in vibration technologies are proposed.

Keywords: developed limited artificial gas cavity, visualization, flow structure, mathematical model, self-oscillation, vibration technologies

References

- [1] Shkapov P.M., Blagoveshchenskaya M.M. Teoreticheskie i prikladnye voprosy dinamiki tekhnicheskoy zhidkosti s ogranichennoj iskusstvennoj gazovoy kavernoj. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya Estestvennye nauki*, ch. 1, 2012, no. 3, pp. 109–114; ch. 2, 2012, no. 4, pp. 117–125. (In Russ.).
- [2] Blagoveshchenskij I.G., Gartig E.B., SHkapov P.M. O gisterезisnom karaktere razvitiya avtokolebaniy v gidrolinii s ogranichennoj iskusstvennoj gazovoy kavernoj na vyhode. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana*, 2013, no. 10. (In Russ.).
- [3] SHkapov P.M. Avtokolebaniya v gidrosistemah s ogranichennoj iskusstvennoj gazovoy kavernoj v potoke zhidkosti. *Trudy III Vserossiyskogo s"ezda po fundamental'nyim problemam teoreticheskoy i prikladnoy mekhaniki*, In 4 vols. Ufa, 2019, vol. 2, pp. 263–264. (In Russ.).
- [4] Kinelev V.G., SHkapov P.M. *Sposob ochistki razlichnykh poverhnostej izdelij i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya*. Patent RU 2084296 C1 Russian Federation, 20.07.1997.

Отработка панорамного теневого метода диагностики дисперсности распыла форсунки

С.С. Попович¹ pss@imec.msu.ru

А.Г. Здитовец¹,

Н.А. Киселев¹

Ю.А. Виноградов¹

Н.С. Маластовский^{1,2}

¹ НИИ механики МГУ, Москва, Россия

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Цифровой анализ теневого SSP (shadow photography) изображения капель позволяет определить положение и границу объекта в момент фоновой подсветки лазером, что

важно в задачах термоаэродинамики двухфазного потока. Проведена серия измерений распределения водных капель по размерам при распыле центробежной форсункой с помощью метода Polis Spray в сравнении с данными производителя форсунки.

Ключевые слова: двухфазный поток, диаметр Заутера, теневой метод

*Работа выполняется в рамках госбюджетной темы
AAAA-A16-116021110200-5 НИИ механики МГУ.*

Development of a Panoramic Shadow Method for Diagnosing the Dispersion of the Nozzle Spray

S.S. Popovich¹

pss@imec.msu.ru

A.G. Zditovets¹

N.A. Kiselev¹

Yu.A. Vinogradov¹

N.S. Malastovskiy^{1,2}

¹Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²BMSTU, Moscow, Russia

Digital analysis of the SSP (shadow photography) image of droplets allows to determine the position and boundary of the object at the time of background illumination with a laser, which is important in the tasks of thermal aerodynamics of a two-phase flow. A series of measurements of the size distribution of water droplets when sprayed with a centrifugal nozzle using the Polis Spray method was carried out in comparison with the data of the nozzle manufacturer.

Keywords: two-phase flow, Sauter diameter, shadow photography

*The work is carried out within the framework of the state budget theme
AAAA-A16-116021110200-5 of MSU Institute of Mechanics.*

Экспериментальное исследование параметров теплообмена в малоразмерном сопле в условиях ламинаризации

Н.А. Киселев¹

kiselev.nick.a@gmail.com

Н.С. Маластовский^{1,2}

Ю.А. Виноградов¹

¹ НИИ механики МГУ, Москва, Россия

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Исследованы процессы теплообмена в малоразмерном сопле. Умеренный разгон потока и малые числа Рейнольдса позволили получить режимы течения, характерные

для процесса обратного (турбулентного-ламинарного) перехода пограничного слоя. Зафиксировано снижение интенсивности теплообмена, получены величины относительных коэффициентов теплоотдачи при различных параметра ускорения потока K . Выполнено сравнение влияния на теплообмен параметра K полученного за счет изменения полного давления в форкамере и геометрии разгонной части. Сделаны выводы о достижении предельного значения снижения интенсивности теплообмена.

Ключевые слова: теплообмен, газовая динамика, ламинаризация

Experimental Study of Heat Transfer Parameters in a Small-Sized Combination under Laminarization Conditions

N.A. Kiselev¹

kiselev.nick.a@gmail.com

N.S. Malastovskiy^{1,2}

Yu.A. Vinogradov¹

¹ Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² BMSTU, Moscow, Russia

The paper present result of experimental investigation of the heat transfer in a small nozzle. Moderate flow acceleration and a small Reynolds number produce flow regimes, e, which is characterized by the reverse (turbulent-laminar) transition of the boundary layer. Reducing in heat transfer rate detected, and the value of the relative heat transfer coefficient is obtained for various flow parameters K . Conclusions are drawn about the limiting value of the reducing of heat transfer.

Keywords: heat transfer, gas dynamics, laminarization

Численное моделирование процесса фильтрации газа и воды в микромоделях пористой среды

Л.Э. Казина^{1,2}

kazinaliliya@mail.ru

А.А. Мирзаянов^{1,2}

В.А. Ниценко¹

Ю.А. Питюк^{1,2}

А.Ю. Ломухин³

¹ ООО «РН-БашНИПНефть», Уфа, Россия

² Башкирский государственный университет, Уфа, Россия

³ АО «Роспан Интернешнл», Новый Уренгой, Россия

Для выбора и обоснования эффективных составов для ограничения водопритока в газовые скважины необходимо понимание поведения многофазной системы на масштабе отдельных пор. В рамках данной работы использовались методы вычисли-

тельной микрофлюидики с использованием платформы OpenFOAM для анализа влияния смачиваемости породы на особенности двухфазной фильтрации воды и газа в трех микромоделях. Для модели порового дублета обнаружено, что часть воды может оставаться в узком канале, что ограничивает водоприток. Показано, что в T-образной модели при низких скоростях фильтрации в трещину могут поступать капли воды из пористой матрицы, закупоривая тем самым прямой поток газа по трещине. Для микромодели пористой среды с трещиной с «ловушками» обнаружено, что в случае гидрофильной поверхности вытесняемая вода остается в «ловушках» трещины, в отличие от гидрофобной поверхности, где вся вода вытесняется из трещины. Таким образом, результаты могут быть использованы для выбора эффективного агента для ограничения водопритока в газовые скважины.

Ключевые слова: двухфазная фильтрация, пористая среда, капиллярные силы, OpenFOAM, вычислительная микрофлюидика

Литература

- [1] Carrillo F.J., Bourg I. C., Soulaine C. Multiphase flow modeling in multiscale porous media: an open-source micro-continuum approach. *Journal of Computational Physics: X*, 2020, vol. 8, art. 100073.
- [2] Chatzis I., Dullien F.A.L. Dynamic immiscible displacement mechanisms in pore doublets: theory versus experiment. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1983, vol. 91, no. 1, pp. 199–222.

Numerical Modeling of Gas and Water Filtration Process in Micromodels of Porous Medium

L.Z. Kazina^{1,2}

kazinaliliya@mail.ru

A.A. Mirzayanov^{1,2}

V.A. Nitsenko¹

Yu.A. Pityuk^{1,2}

A.Yu. Lomukhin³

¹ RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russia

² Bashkir State University, Ufa, Russia

³ JSC Rospan International, Novyi Urengoy, Russia

It is necessary to understand the behavior of multiphase system on a pore scale to select and justify the effective composition for limiting water influx in gas wells. In the work we used methods of computational microfluidics using OpenFOAM software to analyze the influence of rock wettability on features of multiphase flow in three different micromodels. In a porous doublet model it was found that part of the water can stay in a narrow channel which limits water influx. It was shown that in a T-shaped model at low filtration velocities water drops can get into the fracture from a porous matrix. It pinches a direct flow along the fracture. In a micromodel of porous medium with a fracture and traps it was found that in case of hydrophilic surface displaced water remains in fracture traps unlike the hydro-

phobic surface where all of the water is displaced from the fracture. Thus, results may be used for selecting of agent of limiting water influx in gas wells.

Keywords: two-phase filtration, porous medium, capillary forces, OpenFOAM, computational microfluidics

References

- [1] Carrillo F.J., Bourg I. C., Soulaine C. Multiphase flow modeling in multiscale porous media: an open-source micro-continuum approach. *Journal of Computational Physics: X*, 2020, vol. 8, art. 100073.
- [2] Chatzis I., Dullien F.A.L. Dynamic immiscible displacement mechanisms in pore doublets: theory versus experiment. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1983, vol. 91, no. 1, pp. 199–222.

Колебательные режимы трансзвукового течения в изогнутом канале

А.Г. Кузьмин a.kuzmin@spbu.ru

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Исследования высокоскоростных течений газа в изогнутых каналах представляют практический интерес в связи с необходимостью повышения энергоэффективности сверхзвуковых компрессоров и воздухозаборников воздушно-реактивных двигателей. Одним из путей такого повышения является снижение потерь полного давления на ударных волнах, формирующихся в канале. В [1] было численно исследовано взаимодействие ударных волн с течением расширения, формирующимся около изгиба стенки в 9° , и выявлено наличие гистерезиса ударно-волновых структур, а также сочетания угла атаки α , числа Маха на входе в канал M_∞ и давления в выходном сечении p_{exit} , при которых происходят резкие переходы между разными режимами течения. В настоящей работе изучаются нестационарные режимы течения в вышеуказанном канале при наличии гармонических колебаний параметров на входе и выходе из канала. Показано, что потери полного давления существенно зависят как от частоты колебаний параметров $M_\infty, p_{\text{exit}}$, так и от выбора их средних значений.

Ключевые слова: турбулентное течение, численное моделирование, уравнения Рейнольдса, ударные волны, нестационарные возмущения.

Литература

- [1] Kuzmin A. Non-uniqueness of transonic flow in an intake-type channel. *J Physics, Conference Series*, 2019, vol. 1392, art. 012012. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1392/1/012012>

Oscillatory Regimes of Transonic Flow in a Bent Channel

A.G. Kuzmin

a.kuzmin@spbu.ru¹

St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

Studies of high-speed flows in bent channels are of practical interest for the advanced design aimed at a higher efficiency of supersonic compressors and intakes of air-breathing engines. One of the ways of increasing the efficiency is a reduction of losses across shock waves formed in the channel. The paper [1] addressed an interaction of shock waves arising in a bent channel with the expansion flow formed near the wall bend of 9° . Numerical simulations showed the existence of a flow hysteresis and combinations of the angle of attack α , the inflow Mach number M_∞ , and pressure p_{exit} given in the exit section, which trigger abrupt transitions between different flow regimes. In the present paper, we perform numerical simulation of the unsteady flow in the aforementioned channel under harmonic oscillations of the parameters given at the inlet and outlet of channel. It is shown that total pressure losses depend significantly on both the frequency of oscillations of the parameters M_∞ , p_{exit} and the choice of their average values.

Keywords: turbulent flow, numerical simulation, Reynolds equations, shock waves, unsteady perturbations

References

- [1] Kuzmin A. Non-uniqueness of transonic flow in an intake-type channel. *J Physics, Conference Series*, 2019, vol. 1392, art. 012012. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1392/1/012012>

Взаимодействие местных сверхзвуковых зон при трансзвуковом обтекании осесимметричного тела

К.В. Бабарыкин

konst20@mail.ru

А.Г. Кузьмин

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Проведено численное моделирование трехмерного турбулентного обтекания осесимметричного тела при углах атаки до 6° и числах Маха набегающего потока $0,938 \leq M_\infty \leq 0,952$. Моделирование основано на системе уравнений Рейнольдса с использованием моделей турбулентности $k-\omega$ SST и DES. Расчеты поля течения выполнены в полной области, ограниченной поверхностью тела и удаленной внешней границей, в отличие от [1], где расчетная область была расположена по одну сторону от плоскости симметрии (плоскости тангажа). Полученные решения показывают наличие двух разрывов в графиках зависимости коэффициентов подъемной силы и момента тангажа от числа Маха M_∞ . Проанализировано взаимодействие ударных волн и местных сверхзвуковых зон; обсуждаются физические причины возникновения вышеуказанных разрывов.

Ключевые слова: турбулентное течение, численное моделирование, ударные волны, распределение давления, момент тангажа

Литература

- [1] Kuzmin A., Babarykin K. Instability of a Shock Wave over a Backward-Facing Ramp. *ARPN J. Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol. 13, pp. 1742–1746.

Interaction of Local Supersonic Regions in Transonic Flow over an Axisymmetric Body

K.V. Babarykin konst20@mail.ru

A.G. Kuzmin

St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

Numerical simulations of three-dimensional turbulent flow over an axisymmetric body have been performed at angles of attack $\alpha \leq 6^\circ$ and free-stream Mach numbers $0.938 \leq M_\infty \leq 0.952$. The simulations are based on the system of Reynolds equations using $k-\omega$ SST and DES turbulence models. Computations are performed in the full domain between the body surface and remote outer boundary in contrast to [1] where the computational domain was located on one side from the symmetry plane (pitching plane). The obtained solutions reveal two discontinuities in the dependencies of lift and pitching moment coefficients on the Mach number M_∞ . Interaction of shock waves and local supersonic regions is analyzed, and a physical interpretation of the aforementioned discontinuities is discussed.

Keywords: turbulent flow, numerical simulation, shock waves, pressure distribution, pitching moment

References

- [1] Kuzmin A., Babarykin K. Instability of a Shock Wave over a Backward-Facing Ramp. *ARPN J. Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol. 13, pp. 1742–1746.

О методе расчета эволюции ударной волны в неоднородной среде. Эволюция идеи

A.H. Богданов bogdanov@imec.msu.ru

НИИ механики МГУ, Москва, Россия

Разработка эффективного метода расчета параметров ударной волны (УВ) в неоднородной среде — актуальная, в связи с приложениями, задача газовой динамики, в частности, связанная с разработкой способов защиты от ударно-волнового воздействия [1].

Исследования такого рода предпринимались разными авторами, различными методами, основанными на различных идеях. Название статьи автору подсказала работа О. Филлипса «Взаимодействие волн — эволюция идеи» [2], согласимся с ее автором, что конечная стадия эволюции идеи, по-видимому, достигается, когда ее применимость именно к этой задаче становится очевидной.

В простейшем случае неоднородной среды, представляющей собой одномерную, в направлении распространения волны, стратификацию температуры и плотности при постоянном давлении и покое среды, эта задача была рассмотрена Дж. Уиземом [2], весьма оригинальный метод которого позволил ему получить удивительно простую зависимость скорости УВ (в приближении сильных волн) от плотности газа перед ней (γ — показатель адиабаты)

$$D \sim \rho_0^{-\beta}; \quad \beta = \beta(\gamma) = \text{const} > 0. \quad (1)$$

Зависимость (1) давала правильный качественный (далеко не количественный) результат, показывая, что при понижении плотности среды перед фронтом УВ $\rho_0 < \rho(0)$ (что при покое среды и постоянном давлении в ней соответствовало повышению ее температуры) волна ускоряется, при повышении плотности — замедляется. Явным же недостатком зависимости (1) было отсутствие, при расчетах по ней, всякого последствия при прохождении УВ стратифицированного слоя: как только плотность среды принимала исходное значение, УВ восстанавливала свою исходную скорость. Такое отсутствие рассеяния энергии есть, конечно, абсолютно соответствующий действительности результат.

Предложенный в [3] (много позже) Уизема автором этой статьи метод расчета параметров УВ в неоднородной среде заключался в том, что распространение УВ в неоднородной среде можно рассматривать как процесс прохождения волной последовательности очень тонких слоев, в каждом из которых изменение плотности очень мало и вызывает слабый отклик скорости рассматриваемой волны, так что в установленной по соотношениям на разрыве и условию отсутствия приходящих на фронт УВ возмущений из уже пройденных ей областей зависимости возмущения скорости от возмущения

плотности $\delta D = \delta D(\delta \rho_0)$ можно перейти к пределам $\frac{\delta D}{\delta x} = \frac{\delta \rho_0}{\delta x}$ при $\delta x \rightarrow 0$.

В результате можно получить и саму зависимость в дифференциальной форме, причем для любой интенсивности УВ, а не только сильных волн, как у Уизема,

$$D \sim D(\rho_0). \quad (2)$$

Замечательно, что в приближении сильных УВ зависимость (2) дает в точности полученную Уиземом связь (1). Как и (1), (2) также не позволяет

рассчитать диссипацию энергии УВ на областях неоднородности, хотя, она допускает уточнение вычислением следующих членов ряда:

$$D = D(0) + \delta D_1 + \delta^2 D_2 + \dots$$

Весьма существенной особенностью описанных выше методов является абсолютный неучет ими принципиального качественного различия процессов выхода УВ в более или менее плотную среду. В первом случае назад в исходную среду отражается УВ, во втором — волна разрежения, эти процессы описываются разными соотношениями при их моделировании методом распада произвольного разрыва [2]. Следование этим путем как раз и позволяет избежать вышеперечисленных недостатков методов определения параметров УВ, прогрессирующей в неоднородную среду, поскольку такое решение является точным. Но, вероятно, для этой задачи неокончательным.

Литература

- [1] Богданов А.Н. Сильные ударные волны. Способы воздушной защиты. *Актуальные проблемы защиты и безопасности. средства противодействия терроризму. Тр. XXIII Всерос. науч.-практ. конф.* Санкт-Петербург, 2020, т. 2, с. 175–179.
- [2] Whitham G.B. *Linear and Nonlinear Waves*. John Wiley & Sons, 1974, 635 p. [Уизем Дж. *Линейные и нелинейные волны*. Москва, Мир, 1977, 622 с.]
- [3] Богданов А.Н. Динамика ударных волн в средах с продольной стратификацией. *Докл. РАН*, 2020, т. 491, № 1, с. 5–6.

Описание вязкоупругого поведения смазки на основе численной процедуры идентификации

А.А. Каменских

Ю.О. Носов

ura.4132@yandex.ru

ПНИПУ, Пермь, Россия

Рассмотрено численное моделирование вязкоупругого поведения смазочного материала на примере ЦИАТИМ-221. Для проведения численного анализа долговечности конструкции необходимо учитывать динамические характеристики используемых материалов. Отсюда возникает потребность в создании численной процедуры по идентификации вязкоупругих свойств смазочного материала. В качестве математической модели поведения смазочного материала выбрана модель Максвелла, где в качестве ядра релаксации рассматриваются ряды PRONY.

Ключевые слова: смазка, вязкоупругость, модель, ряды PRONY

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ
(проект № 22-29-01313).*

Литература

Каменских А.А., Носов Ю.О. Численная идентификация реологических свойств смазочного материала. *Математическое моделирование в естественных науках: матер. XXXI Всерос. школы-конференции*. Пермь, 2022, с. 141–144.

Description of the Lubricant Viscoelastic Behavior based on A Numerical Identification Procedure

A.A. Kamenskikh

Yu.O. Nosov

ura.4132@yandex.ru

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

The paper considers numerical modeling of the viscoelastic behavior a lubricant using the example of CIATIM-221. To conduct a numerical analysis of the durability of a structure, it is necessary to take into account the dynamic characteristics of the materials used. Hence, there is a need to create a numerical procedure for identifying the viscoelastic properties of a lubricant. The Maxwell model is chosen as a mathematical model of the behavior a lubricant, where the PRONY series are considered as the relaxation kernel.

Keywords: lubrication, viscoelasticity, model, PRONY series

This work was supported supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 22-29-01313).

References

Kamenkikh A.A., Nosov Yu.O. Chislennaya identifikatsiya reologicheskikh svoystv smazochnogo materiala. *Matematicheskoye modelirovaniye v yestestvennykh naukakh*. Perm', 2022, pp. 141–144. (In Russ.).

Экспериментальное исследование обтекания цилиндра системой закрученных струй

М.Н. Сергеев

mihail_sergeev@mail.ru

РГАТУ им. П.А. Соловьева, Рыбинск, Россия

Процесс обтекания цилиндра широко используется при организации теплообмена в различных технических устройствах. В данной работе приводятся результаты экспериментального изучения динамики обтекания цилиндра системой закрученных и незакрученных струй. Результаты эксперимента показали, что при наличии закрутки коэффициент сопротивления увеличивается.

Ключевые слова: закрутка потока, система струй, число Рейнольдса, коэффициент сопротивления

Литература

- [1] Божков В.М., Васильев Л.Е., Жигулев С. В. Особенности поперечного обтекания кругового цилиндра. *Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа*, 1980, № 2, с. 154–157.
- [2] Михеев А.Н., Михеев Н.И., Молочников В. М. Интенсификация теплоотдачи поперечно обтекаемого цилиндра в пульсирующем потоке. *Современная наука: сб. науч. ст.*, 2012, № 2, с. 214–219.

Experimental Study of the Flow around a Cylinder by a System of Swirling jets

M.N. Sergeev

mihail_sergeev@mail.ru

RGATU named after P.A. Solovyov, Rybinsk, Russia

The process of cylinder flow is widely used in the organization of heat exchange in various technical devices. This paper presents the results of an experimental study of the dynamics of the flow around the cylinder by a system of twisted and uncoiled jets. The results of the experiment showed that in the presence of a twist, the resistance coefficient increases.

Keywords: flow twist, jet system, Reynolds number, resistance coefficient

References

- [1] Bozhkov V.M., Vasiliev L.E., Zhigulev S.V. Features of transverse flow around a circular cylinder. *Izv. AN USSR. Fluid and gas mechanics*, 1980, no. 2, pp. 154–157. (In Russ.).
- [2] Mikheev A.N., Mikheev N.I., Molochnikov V.M. Intensification of heat transfer of a transversely streamlined cylinder in a pulsating flow. *Modern Science: Collection of scientific articles*, 2012, no. 2, pp. 214–219. (In Russ.).

Исследование крупномасштабных вертикально завихренных течений на основе точных решений уравнений Навье — Стокса

С.А. Берестова

Е.Ю. Провириков

e.iu.prosviriakov@urfu.ru

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Найдено точное решение уравнений Обербека — Буссинеска как решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений пятнадцатого порядка для установившейся конвекции Бенара — Рэлея в бесконечно протяженном горизонтальном слое, описывающее движение вертикально завихренной жидкости. Крупномасштабное течение жидкости рассматривается в приближении тонкого слоя с недеформируемыми границами. Учитываются две горизонтальные компоненты вектора скорости. Исследовано существование устоявшихся противотечений в конвективном потоке жидкости типа Бенара — Рэлея — Куэтта.

Ключевые слова: сдвиговое неоднородное течение, конвекция, класс точных решений
Линя — Сидорова — Аристова, вертикальная закрутка жидкости, противотечения

Investigation of Large-Scale Vertically Swirling Flows Based on Exact Solutions of the Navier — Stokes Equations

S.A. Berestova

E.Yu. Prosviryakov **e.iu.prosviriakov@urfu.ru**

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

The exact solution of the Oberbeck-Boussinesq equations is found. This is the solution of a system of ordinary differential equations of the fifteenth order. A solution has been found for the steady-state Benard-Rayleigh convection. An infinitely extended horizontal layer is considered. The paper describes the motion of a vertically swirling fluid. Large-scale fluid flow is considered in the approximation of a thin layer with non-deformable boundaries. Two horizontal components of the velocity vector are taken into account. The existence of well-established counterflow in a convective fluid flow of the Benard — Rayleigh — Couette type is investigated.

Keywords: shear inhomogeneous flow, convection, Lin — Sidorov — Aristov class of exact solutions, vertical fluid twist, counterflow

Частотные характеристики резонатора для трубы переменного радиуса

В.Г. Байдулов^{1,2} **baydulov@gmail.com**

Пью Ко Ко¹ **phyokoko4387@gmail.com**

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

² Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

В рамках длинноволнового приближения исследованы частоты и формы собственных колебаний газа в трубе периодического сечения, моделирующей камеру сгорания. Задачи сводится к задаче Штурма — Лиувилля с краевыми условиями первого рода, решение которой проводится методом ускоренной сходимости. Проведен детальный анализ зависимостей собственных чисел и собственных функций от параметров трубы. Выявлен «автомодельный» тип зависимости собственной частоты для различных мод. Определены характерные значения параметров периодичности трубы, при которых происходит резкое изменение собственной частоты.

Ключевые слова: резонатор, собственные колебания газа, камера сгорания

*Работа выполнена в рамках госзадания
№ АААА-А20-120011690136-2.*

Frequency Characteristics of the Resonator for a Pipe of Variable Radius

V.G. Baydulov^{1,2}

baydulov@gmail.com

Phyo Ko Ko¹

phyokoko4387@gmail.com

¹ BMSTU, Moscow, Russia

² Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

In the framework of the long-wavelength approximation, the frequencies and forms of natural oscillations of gas in a pipe of a periodic section, simulating a combustion chamber, are studied. The problem is reduced to the Sturm–Liouville problem with boundary conditions of the first kind, which is solved by the accelerated convergence method. A detailed analysis of the dependences of eigenvalues and eigenfunctions on the parameters of the pipe has been carried out. A “self-similar” type of dependence of the natural frequency for various modes is revealed. The characteristic values of the pipe periodicity parameters, at which a sharp change in natural frequency occurs, are determined.

Keywords: resonator, natural oscillations of gas, combustion chamber

The work was carried out within the framework of the state order No. AAAA-A20-120011690136-2.

О движениях твердых тел, имеющих полости с неоднородной жидкостью

А.Н. Темнов

antt45@mail.ru

Чжан Юе

Ян Хаинг У

yn664528@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Приведены результаты исследования динамики неоднородной жидкости в полостях неподвижных и подвижных твердых тел, а также вопросы динамики твердых тел, имеющих полости с неоднородной жидкостью.

Ключевые слова: неоднородная жидкость, твердое тело, колебания

Для будущего освоения космического пространства необходим проект создания заправочных станций на около земной орбите или на других подходящих орбитах. Для подобных проектов становятся актуальными вопросы динамики тел, содержащих криогенную жидкую массу. В работах Н. Е. Жуковского [1] и учебной литературе, посвященной ракетно-космической тематике [2], вопросы динамики тел, содержащих однородную жидкость, разработаны в достаточной мере. Однако проблемы, связанные с динамикой тел, содержащих жидкость, частицы которой могут иметь неодинаковую плотность, температуру, почти не исследованы.

В докладе приведены уравнения движения рассматриваемой механической системы. Показано, что в эллипсоидальной и сферической емкостях, гидродинамическое воздействие неоднородной жидкости создается конечным числом парциальных движений жидкости. В случае цилиндрической полости гидродинамическое воздействие создается счетным множеством парциальных движений, определяемых стратификацией жидкости.

Литература

- [1] Жуковский Н.Е. *О движении твердого тела, имеющего полости, наполненные однородной капельной жидкостью*. Собр. соч. Москва, Гостехиздат, 1948, т. II, 143 с.
- [2] Колесников К.С. *Динамика ракет*. Москва, Машиностроение, 2003, 600 с.

About the Motions of Solid Bodies Having Cavities with an Inhomogeneous Fluid

A.N. Temnov

antt45@mail.ru

Zhang Yu

Yan Naing O

yno64528@gmail.com

BMSTU, Moscow, Russia

The report presents the results of a study of the dynamics of an inhomogeneous fluid in the cavities of stationary and moving solids, as well as issues of the dynamics of solids having cavities with an inhomogeneous fluid.

Keywords: inhomogeneous liquid, solid body, vibrations

For the future of space exploration, a project is needed to create refueling stations in near-Earth orbit or in other suitable orbits. For such projects, the issues of dynamics of bodies containing cryogenic liquid mass become relevant. In the works of N. E. Zhukovsky [1], and in the educational literature devoted to rocket and space topics [2], the issues of the dynamics of bodies containing a homogeneous liquid have been sufficiently developed. However, the problems associated with the dynamics of bodies containing a liquid, the particles of which may have different densities and temperatures, are almost not investigated.

The report presents the equations of motion of the considered mechanical system. It is shown that in ellipsoidal and spherical containers, the hydrodynamic effect of an inhomogeneous fluid is created by a finite number of partial movements of the fluid. In the case of a cylindrical cavity, the hydrodynamic effect is created by a countable set of partial motions determined by the stratification of the fluid.

References

- [1] Zhukovsky N.E. About the motion of a solid body having cavities filled with a homogeneous droplet liquid. Collection of essays. vol.2, Gostekhizdat, 1948, 143 p. (In Russ.).
- [2] Kolesnikov K.S. Rocket dynamics. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 600 p. (In Russ.).

Нелинейные колебания двух слоев жидкостей в цилиндрических емкостях

*Вин Ко Ко*¹ *win.c.latt@gmail.com*

*А.Н. Темнов*² *antt45@mail.ru*²

¹ Академия оборонных служб, Центр высшего образования,
Пьин У Лвин, Мьянма

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрены нелинейные колебания двух слоев жидкостей с разной плотностью, заполняющих цилиндрическую емкость. Поставлена и решена задача об нелинейных движениях сосуда. Круглая цилиндрическая полость целиком заполнена тяжелой двухслойной жидкостью, поверхность раздела которой может совершать вращательное движение. В предлагаемом сообщении рассмотрен круглый цилиндрический сосуд, полностью заполненный двумя несмешивающимися идеальными несжимаемыми жидкостями, и совершающий колебания вокруг неподвижной горизонтальной оси OY . Получены нелинейные дифференциальные уравнения, описывающие эффект вращательного движения поверхности раздела жидкостей в около резонансном диапазоне основного тона колебаний. В работе также приведены значения вычисленных параметров, определяющих нелинейность волновых движений поверхности раздела жидкостей и связывающих вращательное движение тела и деформацию объема жидкостей.

Ключевые слова: нелинейные колебания, цилиндрическая полость, возмущенная поверхность, вращательное движение

Литература

- [1] Акуленко Л. Д., Нестеров С. В. Нерезонансные колебания твердого тела с полостью, содержащей тяжелую двухслойную жидкость. *Механика твердого тела*, 1987, № 2, с. 52–58.
- [2] Луковский И.А. Введение в нелинейную динамику твердого тела с полостями, содержащими жидкость; Отв. Ред. В.А. Троценко; АН УССР. Ин-т математики. Киев, Наук. думка, 1990, 296 с.

Nonlinear Oscillations of Two Layers of Liquids in Cylindrical Containers

Win Ko Ko¹

win.c.latt@gmail.com

A.H. Temnov²

antt45@mail.ru

¹ Defense Services Academy, Higher Education Center, Pyin Oo Lwin, Myanmar

² BMSTU, Moscow, Russia

In this paper, we considered nonlinear oscillations of two layers of liquids with different densities filling in a cylindrical vessel. The problem of non-linear motions of the vessel is set and solved. The round cylindrical cavity is completely filled with a heavy two-layer liquid, the interface of which can perform rotational motion. In the proposed report, a round cylindrical vessel is considered, completely filled with two immiscible ideal incompressible liquids, which makes small oscillations around a fixed horizontal axis OY . Non-linear differential equations are obtained that describe the effect of rotational motion of the liquid interface in the near-resonant range of the fundamental tone of vibrations. The paper also presents the values of the calculated parameters that determine the nonlinearity of the wave motions of the liquid interface and relate the rotational motion of the body and the deformation of the volume of liquids.

Keywords: nonlinear oscillations, cylindrical cavity, perturbed surface, rotational motion

References

- [1] Akulenko L.D., Nesterov S.V. Non-resonant oscillations of a solid body with a cavity containing a heavy two-layer liquid. *Mekhanika tverdogo tela*, 1987, no. 2, pp. 52–58. (In Russ.).
- [2] Lukovsky I.A. *Introduction to nonlinear dynamics of a solid body with cavities containing a liquid*; Ed. by V.A. Trotsenko; as of the USSR. Institute of mathematics. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1990, 296 p. (In Russ.).

Устойчивость вращения твердого тела с неоднородной жидкостью вокруг вертикальной оси динамической симметрии

A.H. Temnov

antt45@mail.ru

Ян Наинг

yno64528@gmail.com

МГТУ Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Получены и исследованы уравнения сферического движения твердого тела с вращающейся неоднородной несжимаемой жидкостью, заполняющей полностью эллипсоидальную полость. Рассмотрена устойчивость вращения твердого тела с неоднородной жидкостью, имеющей линейное распределение плотности. В предлагаемом сообщении, используя уравнения Эйлера — Лагранжа, получены уравнения сферического движения твердого тела с неоднородной жидкостью, вокруг неподвижной точки, совпадающей с центром масс твердого тела и являющейся одновременно геометрическим центром полости. Твердое тело имеет эллипсоидальную полость, полностью заполнен-

ной неоднородной идеальной жидкостью, совершающей однородное вихревое движение. Полученные уравнения движения имеют первые интегралы, такие как интеграл энергии, интегралы площадей и геометрические интегралы. Исследована устойчивость вращения твердого тела с неоднородной жидкостью, вокруг вертикальной оси симметрии тела и жидкости и приведены достаточные условия устойчивости, полученные с использованием функций Ляпунова, построенных по методу Четаева.

Ключевые слова: неоднородная жидкость, эллипсоидальная полость, однородное вихревое движение, устойчивость

Литература

- [1] Моисеев Н.Н., Румянцев В.В. *Динамика тела с полостями, содержащими жидкость*. Москва, Наука, 1965, 439 с.
- [2] Темнов А.Н. Устойчивость стационарных вращений неоднородной жидкости в эллипсоидальной полости. *Известия вузов. Машиностроение*, 1979, № 7, с. 149–151.

Stability of Rotation of a Solid Body with an Inhomogeneous Fluid around the Vertical Axis of Dynamic Symmetry

A.N. Temnov

antt45@mail.ru

Yan Naing Oo

yno64528@gmail.com

BMSTU, Moscow, Russia

In this paper, the equations of spherical motion of a solid body with a rotating inhomogeneous incompressible fluid that fills a completely ellipsoidal cavity are obtained and investigated. The stability of rotation of a solid with an inhomogeneous liquid having a linear density distribution is considered. In the proposed report, using the Euler-Lagrange equations, the equations of spherical motion of a solid with an inhomogeneous fluid around a fixed-point coinciding with the center of mass of the solid and being at the same time the geometric center of the cavity are obtained. A solid body has an ellipsoidal cavity completely filled with an inhomogeneous ideal fluid performing a homogeneous vortex motion. The resulting equations of motion have the first integrals, such as the energy integral, area integrals, and geometric integrals. The stability of rotation of a solid body with an inhomogeneous fluid around the vertical axis of symmetry of the body and the fluid is investigated and sufficient stability conditions obtained using Lyapunov functions constructed by the Chetaev method.

Keywords: inhomogeneous fluid, ellipsoidal cavity, homogeneous vortex motion, stability

References

- [1] Moiseev N.N., Rumyantsev V.V. *Dynamics of a body with cavities containing liquid*. Moscow, Nauka, 1965, 439 p.
- [2] Temnov A.N. Stability of stationary rotations of an inhomogeneous fluid in an ellipsoidal cavity. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 1979, no. 7, pp. 149–151.

Параметрические колебания криогенной жидкости

Ю.А. Маркина

myuabmstu@yandex.ru

А.Н. Темнов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Проведен анализ устойчивости колебаний криогенной жидкости в зависимости от температуры свободной поверхности, аналитические и численные данные которого представлены в виде диаграмм устойчивости. Использование криогенной жидкости в промышленности привело к необходимости рассмотрения ее колебаний в ограниченном объеме, основным отличием которых является подверженность тепловым воздействиям, в результате которых жидкость приобретает температурное расслоение и переменные по объему физические свойства, которые зависят от целого ряда чисел подобия (степени заполненности резервуара, степени стратификации, отношения коэффициентов теплопроводности оболочки резервуара и жидкости и т. д.). В данной работе рассмотрены малые возмущения жидкости. Рассматриваемая криогенная жидкость принимается за идеальную несжимаемую и стратифицированную в направлении поля массовых сил.

Ключевые слова: криогенная жидкость, устойчивость, колебания

Литература

- [1] Колесников К.С. Динамика ракет. Москва, Машиностроение, 2003, 520 с.
- [2] Домашенко А.М., Темнов А.Н. Тепловые эффекты колебаний криогенных жидкостей. *Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Машиностроение*, 2008, с. 201–214.

Parametric Fluctuations of Cryogenic Liquid

J.A. Markina

myuabmstu@yandex.ru

A.N. Temnov

BMSTU, Moscow, Russia

The report presents an analysis of the stability of cryogenic liquid fluctuations depending on the temperature of the free surface, the analytical and numerical data of which are presented in the form of stability diagrams.

Keywords: cryogenic liquid, stability, fluctuation

References

- [1] Kolesnikov K.S. *Dynamics of rockets*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 520 p. (In Russ.).
- [2] Domashenko A.M., Temnov A.N. Thermal effects of cryogenic liquids fluctuations. *Herald of the BMSTU. Mechanical Engineering*, 2008, pp. 201–214. (In Russ.).

Оценка коэффициента демпфирования колебаний жидкости вблизи линии трехфазного контакта

Юй Чжаокай yuzhaokai933@mail.ru

А.Н. Темнов antt45@mail.ru

П.М. Шкапов spm@bmstu.ru

МГУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Предлагается численный алгоритм расчета коэффициента демпфирования вблизи линии трехфазного контакта на основе метода конечных элементов. Введено граничное условие на линии трехфазного контакта с учетом диссипации энергии на основе общего принципа Гамильтона — Остроградского, что приводит к зависимости динамического угла смачивания от скорости линии контакта в процессе плескания жидкости. После решения задачи о собственных значениях получены комплексные числа с отрицательной частью и определены коэффициенты демпфирования колебаний жидкости вблизи линии трехфазного контакта. Количественно оценено влияние числа Бонда B_0 , объема жидкости β и введенного числа капиллярности C_a на значение коэффициента демпфирования вблизи линии трехфазного контакта.

Ключевые слова: линия трехфазного контакта, угол смачивания, касательные напряжения трения, метод конечных элементов, комплексная частота

Хорошо известные экспериментальные данные Рабиновича и Микишева [1] по определению логарифмического декремента малых колебаний реальной жидкости, которые дают значение в $\sqrt{2}$ больше, по сравнению с расчетами с использованием теории погранслоя. В монографии [2] показывается, что неучет эффектов вблизи линии трехфазного контакта является одной из основных причин рассогласования. В статьях Hocking и Miles [3, 4] обоснованы формулировки краевого условия на линии трехфазного контакта с учетом диссипации энергии в цилиндрических сосудах. В данной работе выведено граничное условие на линии трехфазного контакта в сосудах произвольной формы на основе общего принципа Гамильтона — Остроградского и приведен алгоритм определения коэффициента демпфирования колебаний жидкости вблизи линии контакта на основе метода конечных элементов.

Непосредственные наблюдения показывают, что при колебательном движении жидкость, смочив в первый период стенки сосуда, при следующих циклах совершает движение по поверхности, покрытой пленкой жидкости малой толщины. Причем в плоскости контакта возникают касательные напряжения трения F_τ , пропорциональные касательной составляющей скорости $(\partial h / \partial t) / \sin \alpha_0$ и некоторому коэффициенту трения μ_τ :

$$F_\tau = -\mu_\tau \frac{\partial h}{\partial t} \frac{1}{\sin \alpha_0}. \quad (1)$$

Работа касательных напряжений трения на линии контакта на поле возможных перемещений $\delta h / \sin \alpha_0$ имеет вид

$$\delta Q = \int_{\gamma} F_{\tau} \frac{\delta h}{\sin \alpha_0} d\gamma = - \int_{\gamma} \frac{\mu_{\gamma}}{\sin^2 \alpha_0} \frac{\partial h}{\partial t} \delta h d\gamma. \quad (2)$$

Согласно вариационному принципу Гамильтона — Остроградского для неконсервативных систем [5, с. 148], имеем следующее утверждение:

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T - \Pi) dt = - \int_{t_1}^{t_2} \delta Q dt, \quad (3)$$

где кинетическая энергия T и потенциальная энергия Π имеют выражения:

$$T = \frac{1}{2} \rho \int_{\Omega} \nabla \varphi \cdot \nabla \varphi d\Omega = \frac{1}{2} \rho \int_{\Gamma_0} \varphi \frac{\partial \varphi}{\partial n} d\Gamma, \quad (4)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} \rho g \int_{\Gamma_0} h^2 \frac{\partial z}{\partial n} d\Gamma - \frac{1}{2} \sigma \int_{\Gamma_0} \left[(k_1^2 + k_2^2) h + \Delta_{\Gamma} h \right] h d\Gamma + \frac{1}{2} \sigma \int_{\gamma} \left(\frac{\partial h}{\partial e} + \chi h \right) h d\gamma,$$

причем вариация δh должна удовлетворять условиям изохронности:

$$\delta h_{t=t_1} = \delta h_{t=t_2} = 0. \quad (5)$$

Подставив вариации потенциальной энергии и кинетической энергии в формулу Гамильтона — Остроградского, получим динамическое условие на свободной поверхности и граничное условие на линии трехфазного контакта:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + g \frac{\partial z}{\partial n} h - \frac{\sigma}{\rho} \left[(k_1^2 + k_2^2) h + \Delta_{\Gamma} h \right] = 0 \text{ на } \Gamma_0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial h}{\partial e} + \chi h + \frac{\mu_{\gamma}}{\sigma \sin^2 \alpha_0} \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \text{ на } \gamma. \quad (7)$$

Из полученного граничного условия (7) на линии трехфазного контакта вытекают другие две модели движения линии контакта:

1). Для идеальной жидкости $\mu_{\gamma} = 0$, т. е. имеем модель постоянного угла смачивания [6]:

$$\frac{\partial h}{\partial e} + \chi h = 0 \text{ на } \gamma. \quad (8)$$

2). Жидкость пересекает кольцевые ребра, т. е. имеется модель неподвижной линии контакта:

$$h = 0 \text{ на } \gamma. \quad (9)$$

Полученное граничное условие (7) дает физическое объяснение диссипации энергии вблизи линии смачивания и в дальнейших расчетах увидим, что применение граничного условия (7) приводит к получению комплексной частоты колебаний, вещественная часть которой есть коэффициент затухания колебаний жидкости вблизи линии контакта.

Запишем безразмерную формулировку задачи о малых колебаниях капиллярной жидкости с учетом диссипации энергии на линии контакта:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi = 0 \text{ в } \Omega, \quad \frac{\partial\varphi}{\partial n} = 0 \text{ на } \Sigma, \quad \frac{\partial\varphi}{\partial n} = \frac{\partial h}{\partial t} \text{ на } \Gamma_0, \\ \frac{\partial\varphi}{\partial t} + B_0 h r_{0s} - \left[(k_1^2 + k_2^2) h + \Delta_\Gamma h \right] = 0 \text{ на } \Gamma_0, \quad \frac{\partial h}{\partial e} + \chi h + C_a \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \text{ на } \gamma. \end{aligned} \quad (10)$$

где $B_0 = \rho g r_2^2 / \sigma$ — число Бонда, характеризующее соотношение массовой силы и силы поверхностного натяжения, C_a — число капиллярности, означающее соотношение силы вязкости и силы поверхностного натяжения:

$$C_a = \frac{\sqrt{\rho r_2^3 \omega_n^2 / \sigma}}{\rho r_2^2 \omega_n \sin^2 \alpha_0 / \mu_\gamma} = \frac{\omega_n^*}{\text{Re}_n^*}.$$

Здесь ω_n^* и Re_n^* — безразмерная собственная частота и введенный безразмерный критерий Рейнольдса для капиллярной жидкости.

Решения задачи $\varphi(r, z, \theta, t)$ и $h(s, \theta, t)$ можно представить в виде

$$\varphi(r, z, \theta, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_n(r, z, \theta) e^{\Omega_n t}, \quad h(s, \theta, t) = \sum_{n=1}^{\infty} h_n(s, \theta) e^{\Omega_n t}, \quad (11)$$

где $\Omega_n = \varepsilon_n + i\omega_n$ — комплексная частота колебаний жидкости, а ε_n — коэффициент затухания за счет диссипации энергии на линии контакта.

Получим вариационную формулировку задачи (10) после исключения переменной времени t : $\delta\Pi_1 = 0$, где функционал Π_1 приобретает вид:

$$\begin{aligned} \Pi_1 = \int_{\Gamma_0} \left\{ \left[B_0 r_{0s} - (k_1^2 + k_2^2) \right] \left(\frac{\partial\varphi_n}{\partial n} \right)^2 + \nabla_\Gamma \left(\frac{\partial\varphi_n}{\partial n} \right) \nabla_\Gamma \left(\frac{\partial\varphi_n}{\partial n} \right) \right\} d\Gamma_0 + \\ + \chi \int_\gamma \left(\frac{\partial\varphi_n}{\partial n} \right)^2 d\gamma + \Omega_n \int_\gamma C_a \left(\frac{\partial\varphi_n}{\partial n} \right)^2 d\gamma + \Omega_n^2 \int_\Omega \nabla\varphi_n \nabla\varphi_n d\Omega. \end{aligned} \quad (12)$$

Проводится дискретизация области, занимаемой жидкостью, треугольными элементами на основе метода конечных элементов [7] и из вариационной формулировки задачи (12) можно получить задачу на определение собственных частот и форм колебаний капиллярной жидкости:

$$\left(\Omega_n^2 \mathbf{M} + \Omega_n \mathbf{C} + \mathbf{K} \right) \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}} = 0. \quad (13)$$

где \mathbf{M} — матрица инерции, \mathbf{C} — матрица вязкости, \mathbf{K} — матрица жесткости, а $\partial\Phi/\partial\mathbf{n}$ — матрица скоростей жидкости на свободной поверхности.

В программе MATLAB реализуется алгоритм решения задачи на основе метода конечных элементов и получены комплексные частоты первого тона

при различных числах Бонда B_0 , объемах заполнения сосуда жидкостью β и числах капиллярности C_a .

Литература

- [1] Микишев Г.Н., Рабинович Б.И. *Динамика тонкостенных конструкций с отсеками, частично заполненными жидкостью*. Москва, Машиностроение, 1971, 564 с.
- [2] Богоряд Е. Д. *Динамика вязкой жидкости со свободной поверхностью*. Томск, Изд-во Томского ун-та, 1980, 101 с.
- [3] Hocking L.M. The damping of capillary-gravity waves at a rigid boundary. *Journal of Fluid Mechanics*, 1987, vol. 179, pp. 253–266.
- [4] Miles J.W. The capillary boundary layer for standing waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 1991, vol. 222, pp. 197–205.
- [5] Вильке В.Г. Теоретическая механика. Санкт-Петербург, Лань, 2003, 304 с.
- [6] Мышкис А.Д. (ред.), Бабский В.Г., Жуков М.Ю., Копачевский Н.Д., Слобожанин Л.А., Тюпцов А.Д. Методы решения задачи гидромеханики для условий невесомости. Киев, 1992, 592 с.
- [7] Юй Чжаокай. Волновые движения жидкого топлива в тороидальных сосудах с учетом силы поверхностного натяжения. *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*, 2022, № 78, с. 151–165.

Estimation of the Damping Coefficient of Fluid Oscillations on the Three-Phase Contact Line

Yu Zhaokai yuzhaokai933@mail.ru

A.N. Temnov antt45@mail.ru

P.M. Shkapov spm@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

An algorithm is proposed for calculating the damping coefficient of fluid oscillations near the three-phase contact line based on the finite element method. The dependence of the dynamic wetting angle on the speed of the contact line during liquid sloshing leads to energy dissipation and a boundary condition is introduced on the three-phase contact line, taking into account energy dissipation, based on the general Hamilton – Ostrogradsky principle. After solving the problem of eigenvalues, complex numbers are obtained with a negative part, which means the damping coefficient of fluid oscillations near the three-phase contact line. The influence of the Bond number B_0 , the liquid volume β , and the introduced capillarity number C_a on the value of the damping coefficient near the three-phase contact line is quantitatively estimated.

Keywords: three-phase contact line, contact angle, tangential friction stresses, finite element method, complex frequency

References

- [1] Mikishev G.N., Rabinovich B.I. Dynamics of thin-walled structures with compartments partially filled with liquid. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971, 564 p. (In Russ.).

- [2] Bogoryad Ye.D. Dynamics of a viscous fluid with a free surface. Tomsk, Publishing House of Tomsk University, 1980, 101 p. (In Russ.).
- [3] Hocking L.M. The damping of capillary-gravity waves at a rigid boundary. *Journal of Fluid Mechanics*, 1987, vol. 179, pp. 253–266.
- [4] Miles J.W. The capillary boundary layer for standing waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 1991, vol. 222, pp. 197–205.
- [5] Vil'ke V.G. *Theoretical mechanics*. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2003, 304 p. (In Russ.).
- [6] Myshkis A.D., Kopachevskii N.D., Zhukov M.Yu., Slobozhanin L.A., Tiuptsov A.D. *Methods for solving the problems of hydromechanics for weightlessness conditions*. Kiev, 1992. 592 p. (In Russ.).
- [7] Yu Z. Sloshing of a liquid fuel in toroidal tanks with account for capillary effect. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika — Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, 2022, no. 78, pp. 151–165. (In Russ.).

Динамика шнекового насоса системы перераспределения

М.И. Дьяченко s_masyanya@mail.ru

А.Н. Темнов

МГУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Приведено исследование динамики работы бустерного насоса (БН) для перекачки топлива из боковых блоков ракеты-носителя (РН) пакетной схемы в центральный блок с целью повышения энергетических возможностей РН. Наличие дополнительных пневмо-гидравлических связей, возникающих при функционировании системы перераспределения топлива, требует более тщательного учета действия многих возмущающих факторов. Воздействие учитываемых факторов способно повлиять не только на процесс перекачки, но и создать дополнительные проблемы управлением расходом топлива, что может привести к возрастанию гарантийных запасов топлива. В предлагаемом докладе рассмотрена динамика одного из основных звеньев системы перераспределения топлива между ступенями РН — бустерного насоса. В конструктивном исполнении БН состоит из высоконапорного шнека с постоянным шагом, одноступенчатой турбины, работающей на компоненте топлива, отбираемого от основного насоса системы подачи топлива в двигатель, и рабочего колеса турбины, закрепленного на периферийной части рабочего колеса насоса. Исследовано влияние параметров невозмущенного движения на динамические характеристики насоса.

Ключевые слова: насос, шнек, колебания

Литература

- [1] Колесников К.С. *Динамика ракет*. Москва, Машиностроение, 2003, 520 с.
- [2] Овсянников Б.В., Боровский Б.И. *Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей*. Москва, Машиностроение, 1986, 376 с.

The Dynamics of the Screw Pump of the Redistribution System

M.I. Dyachenko

s_masyanya@mail.ru

A.N. Temnov

BMSTU, Moscow, Russia

The report presents a study of the dynamics of the booster pump (BP) for pumping fuel from the side blocks to the launch vehicle (LV) of a batch scheme to the central unit in order to increase the energy capabilities of the LV. The presence of additional pneumohydraulic connections that arise during the operation of the fuel redistribution system requires more careful consideration of the action of many disturbing factors that can affect not only the pumping process, but also creates additional problems in managing fuel consumption, which can lead to an increase in guaranteed fuel reserves. The proposed report considers the dynamics of one of the links in the fuel redistribution system between stages. PH — booster pump. In its design, the BN consists of a high-pressure screw with a constant pitch, a single-stage turbine operating on a fuel component taken from the main pump of the fuel supply system to the engine, and a turbine impeller mounted on the peripheral part of the pump impeller.

Keywords: pump, auger, oscillation

References

- [1] Kolesnikov K.S. *Rocket dynamics*. Moscow, Mashinostroenie, 2003, 520 p. (In Russ.).
- [2] Ovsyannikov B.V., Borovsky B.I. *Theory and calculation of power units for liquid-propellant rocket engines*. Moscow, Mashinostroenie, 1986, 376 p. (In Russ.).

СЕКЦИЯ 4

Прикладная механика

Устройство против буксования колес

Л.А. Сладкова rich.cat2012@yandex.ru

В.А. Симачев

Д.О. Новинский

ВА РВСН им. Петра Великого, Балашиха, Россия

Создание противобуксовочного устройства — актуальная задача во время наступления осенне-весенней распутицы, когда техника вязнет при перемещении. Главным недостатком существующих способов борьбы с буксованием является низкая культура производства и время на их установку. Предлагаемое устройство представляет шарнирно-сочлененную систему (четырёхзвенник), входящую в состав колеса. Выдвижение устройства осуществляется пневмоцилиндром по направляющей, соединенной с поршнем в момент буксования. На направляющей в поршневой полости между внутренним основанием гидроцилиндра и поршнем размещен упругий элемент. Расчеты усилий в звеньях, их геометрических характеристик, траекторий движения основаны на основных положениях теоретической механики, теории механизмов и машин, а также сопротивления материалов. Исследования показали, что для перемещения колеса устройство должно размещаться в количестве 2–6 штук в диаметрально противоположных концах колеса, выступая за поверхность шины.

Ключевые слова: буксование, противобуксовочное устройство, параметры устройства

Литература

- [1] Тарг С.М. *Краткий курс теоретической механики*. Москва, Высшая школа, 2010, 416 с.
- [2] Феодосьев В.И. *Сопротивление материалов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 592 с.

Device against Wheel Slipping

L.A. Sladkova

rich.cat2012@yandex.ru

V.A. Simachev

D.O. Novinsky

Peter the Great Strategic Missile Troops Academy, Balashikha, Russia

Creating a traction control device is an urgent task during the onset of the autumn-spring mudslide, when the equipment gets bogged down when moving. The main disadvantage of existing methods of combating slippage is the low production culture and the time to install them. The proposed device is a hinged-articulated system (four-link system), which is part of the wheel. The extension of the device is carried out by a pneumatic cylinder along the guide connected to the piston at the time of slipping. On the guide in the piston cavity between the inner base of the hydraulic cylinder and the piston there is an elastic element. Calculations of the forces in the links, their geometric characteristics, trajectories of movement are based on the basic provisions of theoretical mechanics, the theory of mechanisms and machines, as well as the resistance of materials. Studies have shown that to move the wheel, the device must be placed in an amount of 2... 6 pieces in diametrically opposite ends of the wheel, protruding beyond the surface of the tire.

Keywords: slipping, traction control, device parameters

References

- [1] Targ S.M. *Kratkiy kurs teoreticheskoy mekhanike*. Moscow, *Visshaya shkola Publ.*, 2010, 416 p. (In Russ.).
- [2] Feodosiev V.I. *Strength of materials*. Moscow, *BMSTU Press*, 2016, 592 p. (In Russ.).

Гармонические волны в вязкоупругом цилиндре секторного поперечного сечения

*И.И. Сафаров*¹

М.Х. Тешаев^{2,3}

*З.И. Болтаев*²

Boltayev-z@mail.ru

*И.М.Каримов*¹

¹ **Ташкентский химико-технологический институт, Ташкент, Узбекистан**

² **Бухарский инженерно-технологический институт, Бухара, Узбекистан**

³ **Бухарское отделение Института Математики им. В.И. Романовского, Бухара, Узбекистан**

Рассмотрено распространение гармонических волн в бесконечном вязкоупругом цилиндре секторного поперечного сечения. Получена спектральная краевая задача, которая решена методами прямых, ортогональной прогонки Годунова, Мюллера и Гаусса.

Ключевые слова: гармоническая волна, цилиндр секторного поперечного сечения, спектральная краевая задача

Литература

Сафаров И.И., Тешаев М.Х., Болтаев З.И. *Математическое моделирование волнового процесса в механическом волноводе с учетом внутреннего трения*. Германия. LAP. 2013. 243 с.

Harmonic Waves in a Viscoelastic Cylinder of Sector Cross-Section

*I.I. Safarov*¹

M.Kh. Teshae^{2,3}

*Z.I. Boltayev*²

Boltayev-z@mail.ru

*I.M. Karimov*¹

¹Tashkent Institute of Chemical Technology, Tashkent, Uzbekistan

²Bukhara Institute of Engineering and Technology, Bukhara, Uzbekistan

³Bukhara Branch of the Institute of Mathematics, named after V.I. Romanovsky, Bukhara, Uzbekistan

The paper considers the propagation of harmonic waves in an infinite viscoelastic cylinder of a sector cross-section. A spectral boundary value problem is obtained, which is solved by the methods of straight lines, orthogonal run of Godunov, Muller and Gauss.

Keywords: harmonic wave, cylinder with sector cross-section, spectral boundary value problem

Reference

Safarov I.I., Teshae M.H., Boltayev Z.I. *Mathematical modeling of the wave process in a mechanical waveguide taking into account internal friction*. Germany. LAP. 2013, p. 243.

Измерение параметров механических ударных процессов при исследовании снижения усталостной прочности

О.Б. Скворцов

oleg.b.skvorcov@gmail.com

ИМАШ РАН, Москва, Россия

Рассмотрены особенности выбора параметров контроля ударно-вибрационных воздействий на конструкционные элементы оборудования с учетом их влияния на зарождение дефектов и их развитие. Отмечен вклад и синергетический эффект аддитивного ударно-вибрационного воздействия на многоцикловую и сверхмногоцикловую усталостную прочность. Представлены рекомендации по выбору первичных измери-

тельных преобразователей и структурных схем виброизмерительных средств, обеспечивающих синхронный контроль деформационных параметров и динамических перегрузок в элементах при их эксплуатации. Корректный выбор измерительных средств обеспечивает получение необходимого динамического диапазона и влияния высокочастотных вибрационных составляющих на точность оценки детерминированных низкочастотных составляющих.

Ключевые слова: удар, ударный спектр, ударная прочность, резонанс, акселерометр, вибрация, перемещение, деформация, перегрузка

Корректный выбор параметров, которые характеризуют процессы вибрации, является определяющим для обеспечения вибрационного мониторинга различного механического оборудования [1]. Влияние вибрации связано не с мгновенным разрушением оборудования под воздействием возникающих динамических сил, а процессами усталостного повреждения конструктивных элементов и материалов.

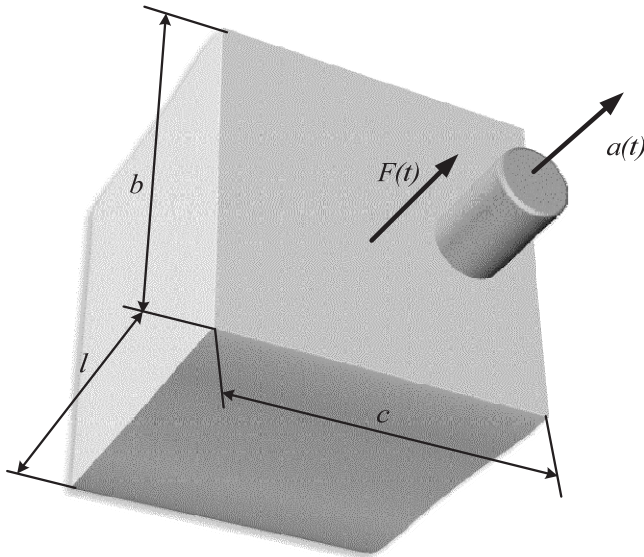


Рис. 1. Контроль датчиком вибрации ускорения $a(t)$ поверхности ячейки материала при возбуждении деформации и вибрации под воздействием внешней силы $F(t)$

Величину вибрации оценивают по уровню сигналов от датчиков механических колебаний, установленных на поверхности материала (рис. 1). Сигнал от датчика вибрации определяется ускорением ячейки материала в соответствии со вторым законом Ньютона. Величина действующей при этом силы действия инерции зависит от массы рассматриваемой ячейки. Для синусоидальных колебаний заданной амплитуды перемещения величина ускорения пропорциональна квадрату частоты. При высокой частоте величина ускоре-

ния или виброперегрузка может стать значительной. Кроме этого высокая частота колебаний может приводить к увеличению числа циклов нагружения и соответствующему снижению порога усталостной прочности, что типично для многоцикловой и сверхмногоцикловой усталости. Внешние динамические действующие на ячейку силы также могут приводить к деформации материала, воспринимаемой датчиком вибрации как перемещение поверхности. Действие деформирующих сил в соответствии с законом Гука не зависит от частоты. Низкочастотные колебания, как правило, характеризуются относительно большими вибрационными перемещениями и очень малыми ускорениями. Для высокочастотных вибраций характерны значительные вибрационные перегрузки и очень малые вибрационные перемещения.

Действие динамических сил, вызывающих перемещение и проявление инерции, а также сил вызывающих деформацию, можно представить как сумму соответствующих механических напряжений $\sigma_N(t)$ и $\sigma_D(t)$ в виде функций от изменений ускорения $a(t)$ и деформации $\varepsilon(t)$. Максимальное значение суммарного механического напряжения ограничено амплитудными оценками переменных. Параметр l при этом предполагается существенно меньшим длины λ волны колебания в материале.

$$\sigma(t) = \sigma_N(t) + \sigma_D(t) = \rho l a(t) + \varepsilon(t) \delta = \rho l a(t) + \rho l a(t) + \delta \frac{d(t)}{l} \leq \rho l A + \frac{\delta}{l} D, \quad (1)$$

где ρ — удельная плотность материала; δ — модуль упругости (модуль Юнга); A и D — амплитуды ускорения и перемещения по результатам измерения вибрации.

Соотношение (1) можно для двухчастотного динамического нагружения представить в виде:

$$\sigma_{\max} \leq \frac{\rho v}{k f_H} (A_H + A_L) + \frac{\delta k f_H}{v} \left(\frac{A_H}{4\pi^2 f_H^2} + \frac{A_L}{4\pi^2 f_L^2} \right), \quad (2)$$

где $k > 2$ — коэффициент, показывающий во сколько раз l меньше длины волны колебаний, распространяющихся в ячейке со скоростью v . A_L и A_H — амплитуды ускорения низкочастотной и высокочастотной аддитивных составляющих вибрации. Частоты этих составляющих соответственно f_L и f_H .

В качестве примера можно рассмотреть оценку максимальных напряжений (2) для образца из меди при $A_L = 0,1$ g и $A_H = 100$ g как функцию частот (рис. 2).

Максимальные оценки механического напряжения при этом соответствуют повышенным частотам для высокочастотного нагружения при минимальной частоте низкочастотного нагружения, а низкочастотные компоненты обеспечивают незначительный подъем при минимальных частотах высокочастотного нагружения, которое и является причиной такого подъема.

Следует отметить, что максимальные механические напряжения даже вне области максимумов имеют величину, которая может составлять замет-

ную часть порога усталости. Это существенно прежде всего при многоцикловой и сверхмногоцикловой усталости.

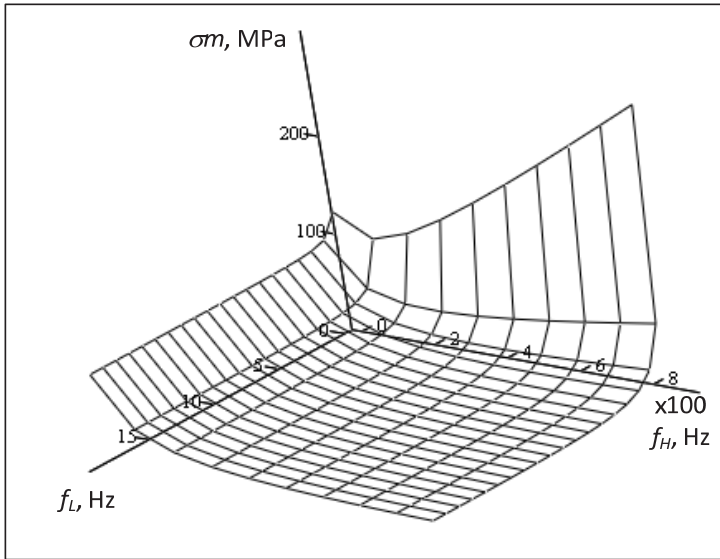


Рис. 2. Оценка возможных максимальных механических напряжений из-за вибрационного воздействия аддитивной смеси колебаний низкой f_L и высокой f_H частот

Вибрация и деформации материала или составных конструкционных узлов могут приводить к образованию и развитию микротрещин. При этом в материале наблюдается проявление акустической эмиссии и фреттинг-коррозии, которые сами сопровождаются формированием высокочастотных ударных механических импульсов в соответствии с моделью, представленной на рис. 3 при зацеплении ячеек контактирующих материалов. Параметры ударного процесса в этом случае носят случайный характер во времени. Они также характеризуются случайными величинами длительности, жесткости j и демпфирования q , которые зависят от геометрических размеров h и характеристик материала.

Анализ действия ударных импульсов на материалы представлен в [2]. Оценки отклика на ударное воздействие в таких случаях характеризуются параметрами удара, которые могут быть измерены по сигналам с акселерометра, установленного на поверхности исследуемого материала. Такой ударный процесс вызывает появление затухающих колебаний в материале, которые могут быть причиной снижения усталостной прочности. В [2] представлены соотношения для расчета относительных перемещений (деформаций) элементов в условиях ударных воздействий.

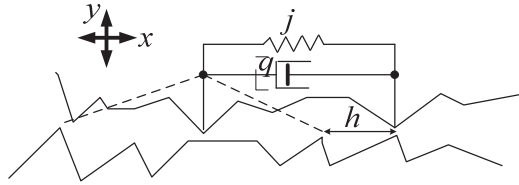


Рис. 3. Модель случайных ударных взаимодействий при трении и фреттинг-коррозии поверхностей контактирующих материалов

В материале в результате ударного воздействия формируются затухающие колебания с частотами и формами, связанными с собственными частотами образцов [3]. Сигналы вибрации характеризуются широкополосными спектрами по перемещению и по ускорению (рис. 4).

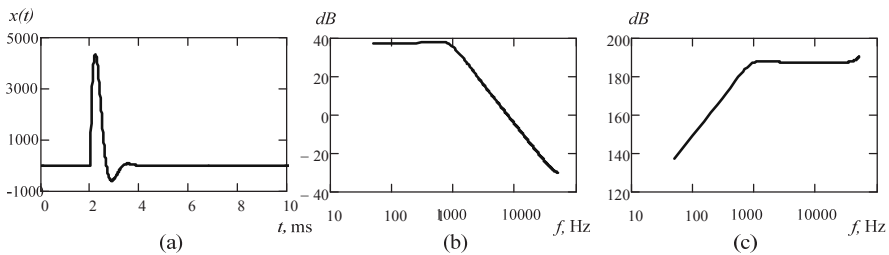


Рис. 4. Форма ударного сигнала в виде затухающей синусоиды (а), спектр перемещений (b) и ударный спектр (с) такого сигнала

При оценке влияния ударного воздействия на усталостную прочность в качестве основной характеристики (ISO 18431-4, NASA-STD-7003A, ECSS-E-ST-10-03C, ГОСТ 28213-89, МЭК 68-2-27-87) принято использовать ударные спектры в виде зависимости ускорения от частоты. В этих случаях действие ударного импульса характеризуется наличием как существенных низкочастотных составляющих по перемещению, так и высокочастотных составляющих по ускорению. Эти вибрационные воздействия могут вносить значимый вклад в формирование циклических механических нагружений в соответствии с (2). Это соотношение можно рекомендовать для использования при оценке повреждаемости в условиях комбинированных нагружений, например, в условиях двухчастотного и ударного нагружения. Для таких оценок обычно используют гипотезу Пальмгрена-Майнера, которая, несмотря на ряд критических замечаний, остается одним из основных методов расчета на величину усталостной прочности.

Литература

- [1] Скворцов О.Б. Вибрационный мониторинг и прочность конструктивных элементов с учетом инерционных свойств материалов при воздействии широкополосной вибрации. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, № 6, 17 с.

- [2] Lalanne C. Mechanical vibration & shock. fatigue damage. V. IV. *HPS*, 2002, 369 p.
[3] Blevis R.D. Formulas for natural frequency and mode shape. *Litton educational*, 1979, 493 p.

Measurement of Parameters of Mechanical Impact Processes in the Study of Fatigue Strength Reduction

O.B. Skvortsov

oleg.b.skvorcov@gmail.com

IMASH RAS, Moscow, Russia

The features of the choice of control parameters for shock-vibration effects on structural elements of equipment are considered, taking into account their influence on the initiation of defects and their development. The contribution and synergistic effect of the additive shock-vibration impact of high-cycle and super-high-cycle effects on fatigue strength is noted. Recommendations are presented on the choice of primary measuring transducers and structural diagrams of vibration measuring devices that provide synchronous control of deformation parameters and dynamic overloads in elements during their operation. The correct choice of measuring instruments provides the required dynamic range and the influence of high-frequency vibration components on the accuracy of estimating deterministic low-frequency components.

Keywords: shock, shock spectrum, impact strength, resonance, accelerometer, vibration, displacement, deformation, overload

References

- [1] Skvortsov O.B. Vibration monitoring and strength of structural elements taking into account the inertial properties of materials under broadband vibration. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2020, no. 6, 17 p. (In Russ.).
[2] Lalanne C. Mechanical vibration & shock. fatigue damage. V. IV. *HPS*, 2002, 369 p.
[3] Blevis R.D. Formulas for natural frequency and mode shape. *Litton educational*, 1979, 493 p.

Продольно-поперечные деформации проводников при электроимпульсном воздействии

О.Б. Скворцов

oleg.b.skvorcov@gmail.com

В.И. Стащенко

ИМАШ РАН, Москва, Россия

Рассмотрены вопросы возбуждения ударных и вибрационных механических процессов в металлах при воздействии на них электрических импульсов. С учетом результатов анализа экспериментальных данных представлены механизмы преобразования энергии электрического импульса в механические колебания с учетом вклада скин-эффекта, динамического пинч-эффекта, поляризации, а также взаимодействия электромагнитных полей проводников. Дана оценка возможного вклада теплового действия динами-

ческих токов на деформацию материала проводников. Приведена оценка возможного вклада различных резонансных процессов в проводниках на генерацию в них вибрационного отклика на воздействие внешних электрических импульсов.

Ключевые слова: вибрация, импульсный ток, магнитное поле, поляризация, усталость, сила Лоренца, сила Ампера, эффект близости, поляризация

Механическое действие импульсного тока на одиночный проводник является основой проявления электропластического эффекта. Применение этого эффекта позволяет снизить сопротивляемость металлов при их механической обработке и улучшить механические свойства материала. В течении длительного периода исследования действия электричества на свойства металла при обработке было предложено много гипотез механизма такого действия. В недавней работе [1] в качестве такого механизма рассмотрено проявление сил Лоренца, связанных с взаимодействием магнитного поля тока в проводнике с этим же проводником. Такой механизм, как и ряд других, предполагает неполярный характер механического отклика, что противоречит имеющимся экспериментальным данным [2]. Исследования поперечной и продольной вибрации проводника показывают однозначную зависимость полярности вибрационного отклика от полярности приложенного электрического импульса. При этом в диапазоне плотностей тока до нескольких тысяч ампер на квадратный миллиметр заметного поперечного сжатия проводника не наблюдается, а имеющиеся поперечные ускорения и перемещения носят характер изгибных колебаний. Кроме того, вибрационный отклик носит характер затухающих гармонических колебаний от действия механического ударного импульса, возникающего в моменты начала переднего и заднего фронтов электрического импульса. Действие такого механического ударного импульса заканчивается задолго до существенного увеличения тока. Это ставит под сомнение такие механизмы, как проявление «электронного ветра», взаимодействующего с дислокациями и дефектами [3].

Если рассмотреть силы, действующие в выделенном, тонком сечении одиночного проводника, можно сделать предположение о силе Лоренца, направленной в данном сечении радиально к центру в начальные моменты фронтов электрического импульса для скачков тока, связанных с распространением в такие моменты только в поверхностном слое материала проводника, что связано со скин-эффектом. Действие этой силы является неполярным и формирует радиальный ток поляризации, но недостаточным для заметного радиального сжатия проводника за счет пинч-эффекта. Пример такого процесса иллюстрируется рис. 1.

Действие силы Ампера суммируется для всех соседних сечений, что создает эффект продольного удара. Поскольку действие этой силы направлено встречно по отношению к направлению внешнего электрического поля E и создаваемого им тока J , а также из-за ограниченности радиальных токов поляризаций, зависимость длительности и амплитуды осевого ударного воздей-

ствия в рассматриваемом диапазоне электрических воздействий близки к линейной. Суммарный продольный механический эффект оказывается заметным и достаточным для перемещений на десятки и сотни микрон, а также ускорений в десятки g .

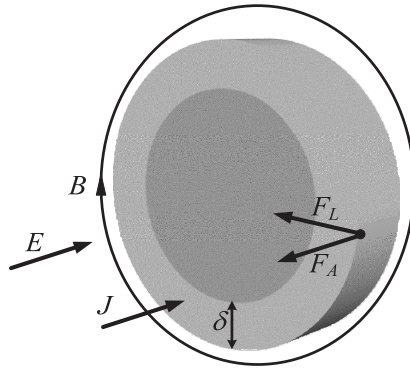


Рис. 1. Формирование скачка у поверхности тока J в момент начала действия скачка внешнего электрического поля E . Силы Лоренца F_L связаны с взаимодействием тока J с магнитной индукцией B этого тока, и приводят к созданию радиальной компоненты тока. Радиальный ток создает продольное магнитное поле, а также взаимодействует с полем B , что создает полярную силу Ампера F_A , которая направлена вдоль оси проводника

Под действием продольного ударного импульса в материале проводника формируется затухающий колебательный процесс, действие которого может сопровождаться вибропластическим эффектом снижения сопротивления механической обработке и изменением структуры материала за счет перемещения дислокаций.

Формирование продольного ударного механического импульса может непосредственно наблюдаться в случае закрепления исследуемого проводника с применением датчика динамических сил, как показано на рис. 2. Такой эксперимент позволяет исследовать динамическую продольную силу $F(t)$ направление которой меняется при изменениях направления электрического импульса. При использовании подвижных электрических контактов можно оценить изменения механического силового отклика от длины части проводника на которую воздействует электрическое поле.

Ток и магнитное поле в проводнике при таком эксперименте можно контролировать быстродействующим бесконтактным датчиком магнитной индукции.

Пример формы сигналов от датчиков для эксперимента с проводником из меди диаметром 5 мм показан на рис. 3. Внешний электрический импульс начинается в момент времени t_0 и продолжается до момента t_1 . Период T_V затухающих колебаний и их частоту f_V можно оценить как $T_V = 1/f_V = t_3 - t_2$.

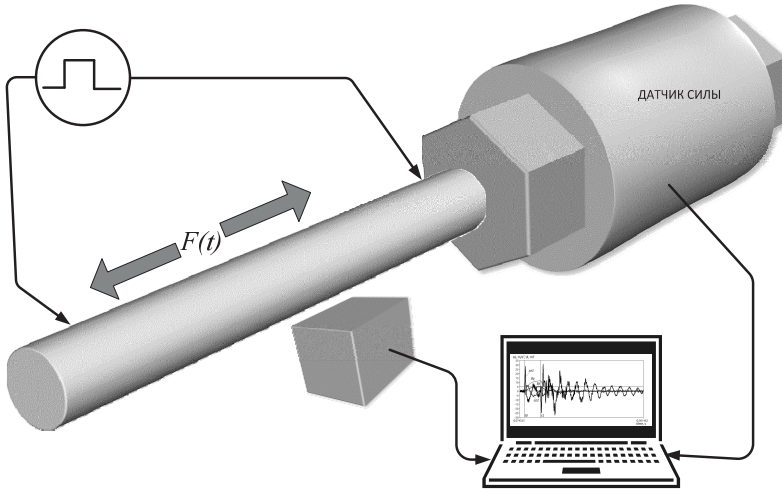


Рис. 2. Структура стенда для исследования продольной динамической силы, формируемой при воздействии внешнего электрического импульса

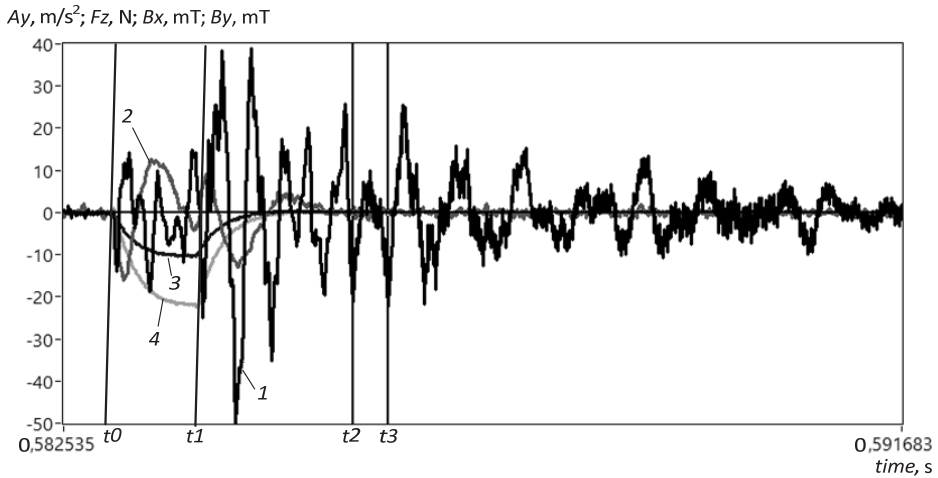


Рис. 3. Отклик на электрический импульс в виде сигналов поперечного изгибного ускорения (1), величины динамической продольной силы (2) и двух ортогональных компонент магнитной индукции (3 и 4)

На рис. 4 приведены зависимости для оценок некоторых из указанных параметров при изменении длины l участка, на который воздействует внешний электрический импульс.

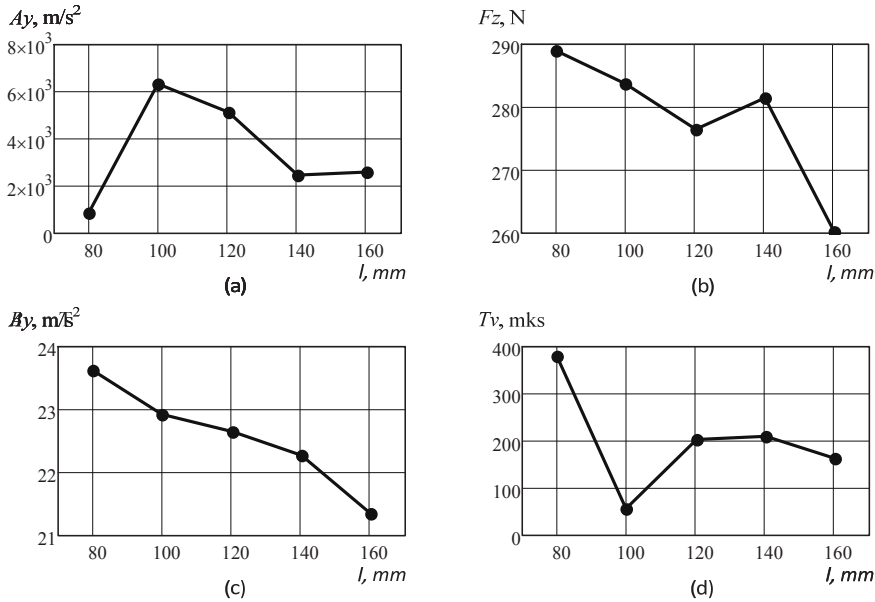


Рис. 4. Зависимость размаха поперечного ускорения (а), продольной динамической силы (б), магнитной индукции (с) и периода колебаний (д) от длины участка действия электрического тока

Исследование процессов вибрационной усталости в электропроводящих элементах имеет существенное значение не только при использовании электропластического эффекта, но и при решении задач обеспечения надежной работы электромеханического оборудования. Такие режимы типичны для генераторов и источников вторичного питания с электроимпульсным управлением [4]. В этих случаях электропроводящие элементы используются в режимах существенных механических нагрузок из-за жестких требований по масса-габаритным параметрам и на высоких частотах импульсов для получения высокого КПД преобразования.

Литература

- [1] Sutton A.P., Todorov T.N. Theory of electroplasticity based on electromagnetic induction. *Physical Review Materials*, 2021, vol. 5, 2021, art. 13605(19).
- [2] Скворцов О.Б., Сташенко В.И., Троицкий О.А. Электропластический эффект и взаимодействие электрического импульса с проводником. *Письма о материалах*, 2021, т. 11, № 4, с. 473–478.
- [3] Raut P., Fuloria D., Bak S., Chatterjee S., Ghosh C., Venkatramani N., Samajdar I. Electropulsing induced plastic deformation in an interstitial free steel. *Materials Science and Technology*, MST18603, 37 p.
- [4] Xie Henry, Guo E. How the switching frequency affects the performance of a buck converter. *Application Report SLVAED3*, TI, 2019, 8 p.

Longitudinal-Transverse Deformations of Conductors under Electropulse action

O.B. Skvortsov

oleg.b.skvorcov@gmail.com

V.I. Stashenko

IMASH RAS, Moscow, Russia

The questions of excitation of shock and vibrational mechanical processes in metals under the action of electrical impulses are considered. Taking into account the results of the analysis of experimental data, the mechanisms for converting the energy of an electric pulse into mechanical vibrations are presented, taking into account the contribution of the skin effect, dynamic pinch effect, polarization, and the interaction of electromagnetic fields of conductors. An estimate of the possible contribution of the thermal action of dynamic currents to the deformation of the conductor material is given. An estimate is given of the possible contribution of various resonant processes in conductors to the generation of a vibrational response in them to the action of external electrical impulses.

Keywords: vibration, impulse current, magnetic shelf, polarization, fatigue, Lorentz force, Ampère force, proximity effect, polarization

References

- [1] Sutton A.P., Todorov T.N. Theory of electroplasticity based on electromagnetic induction. *Physical Review Materials*, 2021, vol. 5, 2021, art. 13605(19).
- [2] Скворцов О.Б., Сташенко В.И., Троицкий О.А. Электропластический эффект и взаимодействие электрического импульса с проводником. *Письма о материалах*, 2021, т. 11, № 4, с. 473–478.
- [3] Raut P., Fuloria D., Bak S., Chatterjee S., Ghosh C., Venkatramani N., Samajdar I. Electropulsing induced plastic deformation in an interstitial free steel. *Materials Science and Technology*, MST18603, 37 p.
- [4] Xie Henry, Guo E. How the switching frequency affects the performance of a buck converter. *Application Report SLVAED3*, TI, 2019, 8 p.

Вибрация металлов при их обработке давлением с использованием электропластического эффекта

В.И. Сташенко

vis20-11@rambler.ru

О.Б. Скворцов

ИМАШ РАН, Москва, Россия

На основе результатов экспериментальных данных приведены рекомендации по выбору параметров электроимпульсного воздействия на металлы в процессе их обработке давлением. В этих условиях проявляется электропластический эффект, состоящий в снижении сопротивления деформации. Дополнительно обеспечивается управление свойствами металла при обработке изделий. Приведены рекомендации

по выбору частоты и длительности внешних электрических импульсов, получаемые на основе измеряемых оценок собственных частот и форм колебаний вибрационного отклика заготовок на действие электрических импульсов.

Ключевые слова: деформация, электропластический эффект, импульсный ток, вибрация, прокатка, волочение, прессование, плющение, виропластический эффект

При обработке металлов дополнительное электрическое воздействие на проводящие элементы используется для создания не только температурных воздействий, но и для формирования динамических колебательных процессов в виде вибрации. Такая вибрация позволяет снизить сопротивление металла при штамповке, резании, сверлении и т. п. Наиболее простым способом является при этом возбуждение в проводниках механических колебаний за счет эффекта близости, при котором на проводники действует сила притяжения или отталкивания (в зависимости от направлений тока), пропорциональная произведению токов через проводники и обратно пропорциональная расстоянию между ними. Пример таких проводников показан на рис. 1.

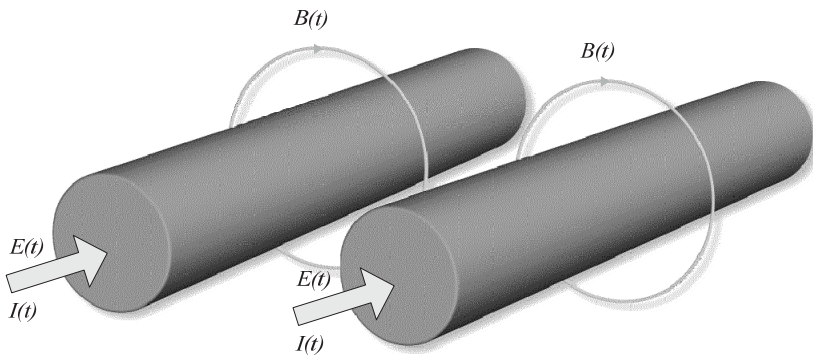


Рис. 1. Механическое взаимодействие проводников за счет эффекта близости

Механическое действие электрического тока также наблюдается и для случая одиночного проводника. В этом случае магнитное поле от тока в проводнике взаимодействует с этим же проводником и для этого случая действия импульсного тока в проводнике формируются динамические деформации, которые влияют на процессы обработки металла. Такое действие электрических токов получило название электропластического эффекта [1].

Проведенные ранее исследования позволили установить зависимость предела текучести от величины и направления плотности тока через проводник [2]. Предел текучести при этом может как снижаться, так и повышаться, что может сопровождаться увеличением циклической прочности. Применение электропластического эффекта характерно для таких металлов как медь, серебро и золото, но возможно и для других металлов и сплавов на основе железа, алюминия, титана и т. д.

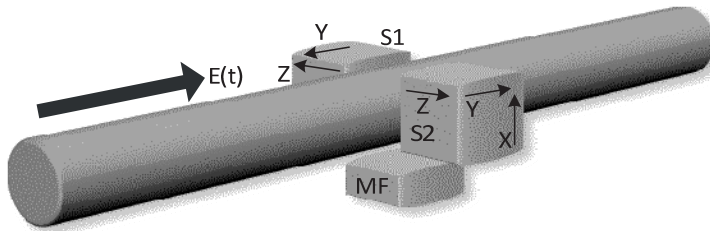


Рис. 2. Схема эксперимента по исследованию вибрационного отклика проводника на воздействие внешнего электрического импульса. Датчики вибрации — акселерометры S1 и S2. Бесконтактный датчик магнитной индукции MF использован для контроля величины магнитного поля и тока через проводник

Для изучения вибрационного отклика в проводнике на пропускание тока можно воспользоваться схемой, показанной на рис. 2. Датчики вибрации позволяют контролировать ускорение и перемещение проводника в поперечном и продольном направлениях при пропускании импульса тока. Изменение тока через проводник при этом можно контролировать по изменению магнитного поля вокруг проводника с помощью бесконтактного датчика магнитной индукции.

Процесс формирования вибрационного отклика на действие электрического импульса может быть представлен в виде диаграммы, показанной на рис. 3. Знак вибрационного отклика определяется полярностью внешнего электрического импульса [3]. Амплитуда вибрационного отклика зависит как от амплитуды внешнего электрического импульса, так и от временных параметров электрического импульса. К таким параметрам относятся длительность и период электрических импульсов для случаев импульсов одной полярности или импульсов чередующейся полярности.

Вибрационные перегрузки в материале проводника при этом могут достигать десятков и сотен g , что влияет не только на сопротивляемость металла пластической деформации, но и приводит к перемещениям дислокаций и может способствовать снижению остаточных напряжений в материале.

При этом электрические воздействия с амплитудой вибрации характерной для упругой деформации показывают зависимость близкую к линейной. Это показано, например, на рис. 4. При таком уровне электрических воздействий нагрев проводника от действия одиночного электрического импульса не превышает нескольких градусов. Длительность электрического импульса целесообразно выбирать в пределах 50...200 мкс. Большее увеличение длительности приводит к нагреву материала проводника, но не увеличивает эффективность преобразования энергии электрического импульса в механические деформации.

Частоты и формы колебаний проводника при электроимпульсном воздействии по порядку величины близки к соответствующим оценкам стержневых элементов аналогичных геометрических размеров.

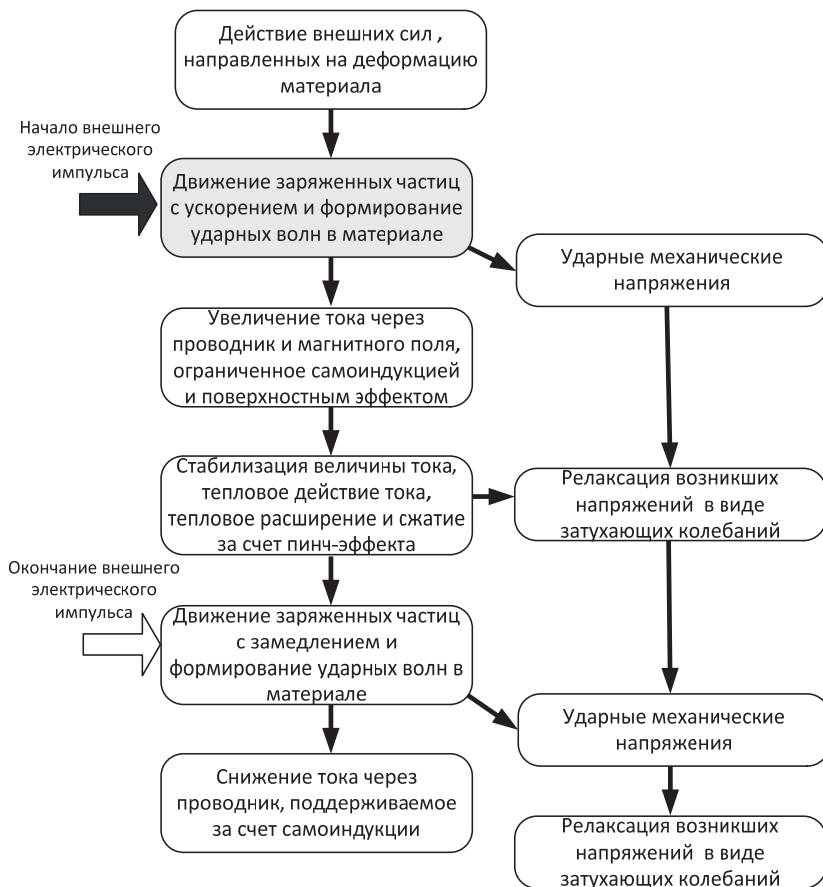


Рис. 3. Последовательность развития процессов в одиночном проводнике при воздействии на него внешнего электрического импульса

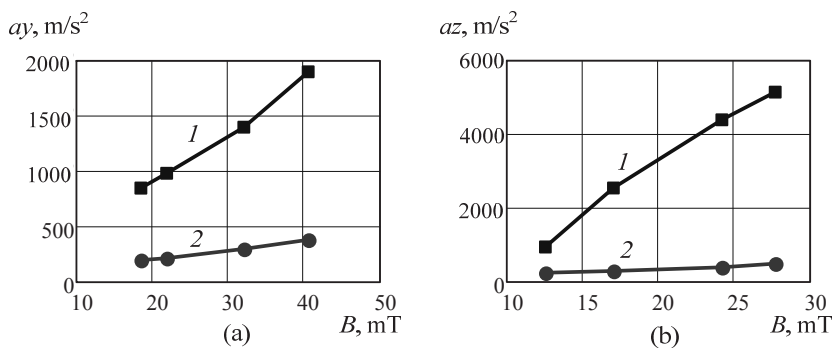


Рис. 4. Зависимости оценок размаха ускорения в осевом (а) и радиальном (б) направлениях от размаха магнитной индукции для проводника из серебра круглого поперечного сечения диаметром 2 мм — 1 и прямоугольного сечением площадью 2 мм² — 2

Процессы нагрева, вибрационного деформирования и снижения остаточных напряжений с использованием электроимпульсного воздействия наиболее полно могут быть реализованы при электроимпульсной сворке металлов.

Литература

- [1] Спицын В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов. Москва, Наука, 1985, 160 с.
- [2] Мельникова Н.В., Хон Ю.А. К теории электропластической деформации металлов. *Физическая мезомеханика*, 2000, т. 3, № 5, с. 59–64.
- [3] Троицкий О.А., Сташенко В.И., Скворцов О.Б. Вибрация электропроводящих элементов мощного энергетического оборудования с импульсными системами питания. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. № 5 (125), с. 102–107.

Vibration of Metals During their Pressure Treatment Using the Electroplastic Effect

V.I. Stashenko **vis20-11@rambler.ru**

O.B. Skvortsov

IMASH RAS, Moscow, Russia

Based on the results of the experimental data, recommendations are given for choosing the parameters of the electropulse effect on metals during their pressure treatment. Under these conditions, an electroplastic effect is manifested, consisting in a decrease in the resistance to deformation. Additionally, the control of metal properties during the processing of products is provided. Recommendations are given for choosing the frequency and duration of external electrical impulses, obtained on the basis of measured estimates of natural frequencies and modes of oscillation of the vibrational response of workpieces to the action of electric impulses.

Keywords: deformation, electroplastic effect, impulse current, vibration, rolling, drawing, pressing, flattening, viroplastic effect

References

- [1] Spitsyn V.I., Troitsky O.A. Electroplastic deformation of metals. Moscow, Nauka Publ., 1985, 160 p. (In Russ.).
- [2] Melnikova N.V., Khon Yu.A. On the theory of electroplastic deformation of metals. *Physical mesomechanics*, 2000, vol. 3, no. 5, pp. 59–64. (In Russ.).
- [3] Troitsky O.A., Stashenko V.I., Skvortsov O.B. Vibration of electrically conductive elements of powerful power equipment with pulsed power supply systems. *Engineering Journal: Science and Innovations*, 2022, no. 5 (125), pp.102–107. (In Russ.).

Контактирование трубы с покрытием и системы втулок в случае сложных форм соприкасающихся поверхностей

К.Е. Казаков

kazakov-ke@yandex.ru

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

Использование покрытий обусловлено разнообразными причинами: защита изделия от внешнего воздействия, обеспечение изоляции и т. д. В общем случае материал покрытия отличается от материала основного тела и поэтому механические свойства тела с покрытием отличны от механических свойств тела без него при прочих равных условиях. Более того, покрытие может иметь достаточно сложный профиль (в силу технологических особенностей нанесения или намеренного получения такого профиля). Наличие неоднородности и сложного профиля приводит к необходимости корректировки расчета напряженно-деформированного состояния тел с покрытиями в местах их контакта с другими элементами. В работе получено аналитическое решение задачи контакта осесимметричной трубы с наружным однородным покрытием и системы жестких втулок в случае, когда диаметры контактирующих поверхностей зависят от осевой координаты.

Ключевые слова: контактная задача, покрытие, жесткие втулки

Contact of Coated Pipe and Bushing Systems in the Case of Complex Shapes of Touching Surfaces

K.E. Kazakov

kazakov-ke@yandex.ru

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

The use of coatings is due to various reasons: protecting the product from external influences, providing insulation, etc. In the general case, the coating material differs from the material of the main body and therefore the mechanical properties of the body with the coating are different from the mechanical properties of the body without it, all other things being equal. Moreover, the coating can have a rather complex profile (due to the technological features of the application or the intentional obtaining of such a profile). The presence of inhomogeneity and a complex profile leads to the need to correct the calculation of the stress-strain state of bodies with coatings at the points of their contact with other elements. In this work, an analytical solution of the problem of contact between an axisymmetric pipe with an outer uniform coating and a system of rigid bushings is obtained in the case when the diameters of the contacting surfaces depend on the axial coordinate.

Keywords: contact problem, coating, rigid bushings

Об аналитических решениях краевых задач для радиально неоднородных кольцевых цилиндров

К.Е. Казаков¹ kazakov-ke@yandex.ru

С.П. Курдина²

¹ **Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия**

² **МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия**

Современные технологии предоставляют возможность производить изделия, свойства и структура материалов переменны. Наличие таких свойств позволяет обеспечивать износостойкость и прочность в сочетании с небольшой массой, необходимой электрической изоляцией и т. д. Настоящая работа посвящена получению аналитических решений краевой задачи для бесконечного радиально-неоднородного упругого кольцевого цилиндра. Показано, что аналитическое решение можно построить только для определенных комбинаций функций, описывающих упругие свойства материала. В работе рассмотрен ряд таких случаев. Продемонстрирован процесс построения аналитического решения, приведены окончательные формулы, сделаны практические выводы.

Ключевые слова: краевая задача, неоднородность, упругий цилиндр

On Analytical Solutions of Boundary Value Problems for Radially Inhomogeneous Annular Cylinders

K.E. Kazakov¹ kazakov-ke@yandex.ru

S.P. Kurдина²

¹ **Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia**

² **BMSTU, Moscow, Russia**

Modern technologies make it possible to produce products, the properties and structure of materials are variable. The presence of such properties makes it possible to provide wear resistance and strength in combination with a small mass, the necessary electrical insulation, etc. This paper is devoted to obtaining analytical solutions to the boundary value problem for an infinite radially inhomogeneous elastic annular cylinder. It is shown that an analytical solution can be constructed only for certain combinations of functions describing the elastic properties of the material. The paper considers a number of such cases. The process of constructing an analytical solution is demonstrated, the final formulas are given, and practical conclusions are drawn.

Keywords: boundary value problem, inhomogeneity, elastic cylinder

Механический анализ медленного процесса аддитивного производства однонаправленного композита на цилиндрической оправке

Д.А. Паршин

parshin@ipmnet.ru

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

Рассматривается медленный процесс послойного формирования композитного изделия на круговой оправке цилиндрической формы с армированием добавляемых в ходе этого процесса монослоев материала относительно тонкими волокнами в поперечном направлении. При образовании различных монослоев допускается варьирование силы натяжения волокон и плотности их укладки. Для механического анализа рассматриваемого процесса используется математическая модель поверхностно непрерывно растущего деформируемого твердого тела [1,2]. В работе проводятся постановка соответствующей неклассической начально-краевой задачи механики в приближении малой деформации и построение замкнутого решения этой задачи. На основе построенного решения дается прогноз эволюционирования распределений технологических напряжений в исследуемом изделии в процессе его производства в зависимости от значений числовых характеристик эффективных свойств получаемого композита и заданных параметров его изготовления. При этом анализируется рост давления на используемую оправку со стороны формируемого на ней изделия и оценивается ослабление натяжения армирующих волокон за счет добавления новых материальных монослоев к части изделия, сформированной к некоторому заданному моменту времени. Полученные в работе зависимости позволяют сформулировать различные математические постановки задач управления механическими показателями моделируемого технологического процесса.

Ключевые слова: аддитивный процесс производства, модель растущего деформируемого твердого тела, технологические напряжения в композитах

*Работа выполнена в рамках темы госзадания ИПМех РАН
№ АААА-А20-120011690132-4.*

Литература

- [1] Manzhairov A.V., Murashkin E.V. (eds.). Theory of continuous additive growth for solids. IUTAM Symposium on Mechanical design and analysis for AM technologies. Symposium materials. Moscow, IPMech RAS Publ., 2018, pp. 27–29.
- [2] Kazakov K.E., Parshin D.A. A model of mechanics of growing solids for the stress-strain analysis of wound composites reinforced with thin unidirectional fibers. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2231, no. 1, art. 012006.

Mechanical Analysis of the Slow Process of Additive Manufacturing an Unidirectional Composite on a Cylindrical Mandrel

D.A. Parshin

parshin@ipmnet.ru

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

The slow process of layer-by-layer formation of a composite product on a cylindrical circular mandrel with reinforcement of material monolayers added during this process with relatively thin fibers in the transverse direction is considered. When forming various monolayers, it is allowed to vary the tension of the fibers and their packing density. For mechanical analysis of the process under consideration, a mathematical model of a layerwise continuously growing deformable solid is used [1,2]. The work presents the formulation of the corresponding non-classical initial boundary value problem of solid mechanics in the approximation of small strain and construction of the closed solution to this problem. On the basis of the constructed solution, a forecast is given for the evolution of technological stress distributions in the product under study during its production, depending on numeral characteristics of the resulting composite effective properties and on the specified manufacture parameters. It is analyzed the increase of the product pressure onto the mandrel and also the weakening of the fibers tension due to the addition of new material monolayers to the product part having been formed by a certain time. The dependences obtained in the work allow to formulate different mathematical statements of the problems on controlling the mechanical indicators of the simulated technological process.

Keywords: additive manufacturing process, model of a growing deformable solid, technological stress in composites

The work is carried out within the framework of State Assignment topic No. AAAA-A20-120011690132-4 to IPMech RAS.

References

- [1] Manzhairov A.V., Murashkin E.V. (eds.). Theory of continuous additive growth for solids. IUTAM Symposium on Mechanical design and analysis for AM technologies. Symposium materials. Moscow, IPMech RAS Publ., 2018, pp. 27–29.
- [2] Kazakov K.E., Parshin D.A. A model of mechanics of growing solids for the stress-strain analysis of wound composites reinforced with thin unidirectional fibers. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2231, no. 1, art. 012006.

Влияние резорбции костной ткани на напряженное состояние вблизи дентальных имплантатов

М.Н. Перельмутер

perelm@ipmnet.ru

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

Представлены результаты численного моделирования влияния резорбции костной ткани на напряженное состояние вблизи винтовых дентальных имплантатов. Для числен-

ного моделирования использовался метод граничных интегральных уравнений. Расчет напряженно-деформированного состояния имплантата и окружающих его костных тканей выполнялся для состояния плоской деформации и содержал два этапа: 1) расчет напряженного состояния всей конструкции имплантата со сглаженным винтовым соединением между имплантатом и окружающей костной тканью; 2) расчет напряженно-деформированного состояния с учетом формы винтового соединения в зоне контакта имплантата и костной ткани. Костная ткань рассматривалась как однородный и изотропный упругий материал.

Ключевые слова: имплантаты, винтовое соединение, резорбция костной ткани, напряженно-деформированное состояние

Введение. Установка имплантатов с большим усилием может привести к созданию значительных напряжений в кортикальной и губчатой костных тканях. Избыточное давление на костную ткань является одним из факторов, способствующим резорбции кости вокруг имплантата. Первые работы, посвященные численному моделированию резорбции костной ткани вблизи дентальных имплантатов, появились относительно недавно [1, 2]. Отметим, что в качестве инструмента численного моделирования в большинстве работ используется метод конечных элементов [1–5]. В данной работе для численного моделирования используется метод граничных интегральных уравнений.

Расчет напряженно-деформированного состояния имплантата и окружающих костных тканей выполнен в постановке плоского деформированного состояния и состоял из двух этапов: 1) расчета всей конструкции имплантата со сглаженным винтовым соединением между имплантатом и окружающей костной тканью; 2) исследования распределения напряжений с учетом формы винтового соединения в зоне сцепления имплантата с костной тканью.

Расчеты выполнены при допущении, что костная ткань является изотропным и однородным упругим материалом. При создании расчетной модели полагалось, что при резорбции костной ткани вокруг имплантата образуется лунка. При выполнении расчетов для полной модели имплантата полагалось, что коронка изготовлена из керамики, а остальные детали имплантата изготовлены из титана. Расчеты выполнены для базовых механических свойств материалов имплантата и костных тканей (см. таблицу 1 в [6]).

Анализ влияния резорбции костной ткани на напряженное состояние на полной конструкции имплантата. Расчетная модель (содержит 7 подобластей) с учетом резорбции костной ткани с указанием вида нагрузки и граничных условий, а также увеличенное изображение верхней части модели, представлены на рис. 1 (для удобства графического представления внешний слой кортикальной кости, винт, каркас и коронка — заштрихованы).

Между всеми соединенными элементами конструкции имплантата полагалось выполнение условий идеального сцепления. На большей части внешней границы кортикальной кости заданы нулевые перемещения. Граничные условия (зоны закрепления) показаны на рисунке тонкой штриховой полосой (обозначение только на рисунке, не является частью модели). Расчетные мо-

дели были сформированы для двух случаев резорбции костной ткани — на $1/3$ длины имплантата (рис.1) и половину длины имплантата. Нагрузка величиной $p=6$ МПа, прикладывалась к окклюзионной поверхности коронки в двух вариантах (в вертикальном направлении и под углом 45° к вертикали). Расчеты выполнены для базовых значений механических свойств костных тканей, $E_{\text{Губ}} = 0,5$ ГПа, $E_{\text{Кор}} = 18$ ГПа. Анализ результатов расчетов показал, что при резорбции костной ткани происходит значительное перераспределение напряжений вблизи имплантата. Напряжения в кортикальной костной ткани снижаются, в губчатой — возрастают.

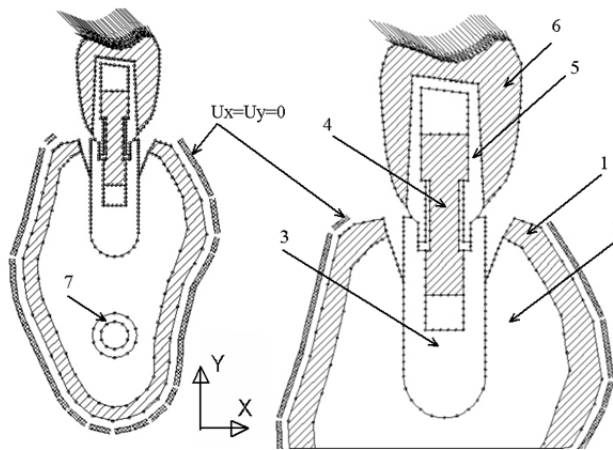


Рис. 1. Дискретизация границ подобластей имплантата и костных тканей, действие наклонной нагрузки, глубина зоны резорбции — $1/3$ длины имплантата, 7 подобластей:

1 — кортикальная кость; 2 — губчатая кость; 3 — имплантат; 4 — винт;
5 — абатмент; 6 — керамические коронка и каркас, 1166 узлов во всей модели

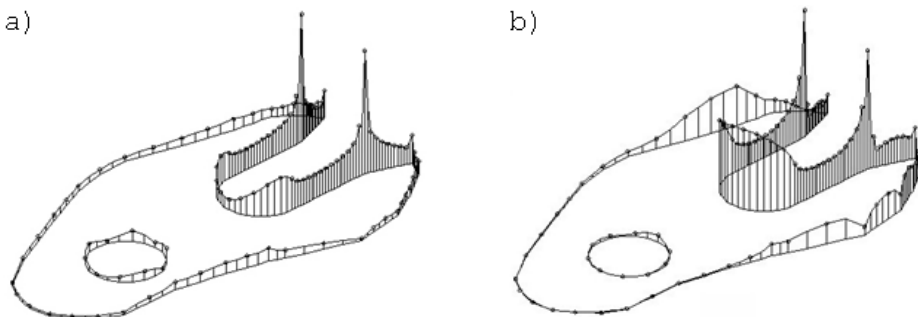


Рис. 2. Интенсивность напряжений σ_i вдоль контура губчатой кости, $h/L = 1/3$;
а — нормальная нагрузка на коронку, максимальные напряжения $\sigma_i = 16,5$ МПа;
б — наклонная нагрузка на коронку, максимальные напряжения $\sigma_i = 28,4$ МПа

Распределения интенсивности напряжений по границе губчатой кости с учетом резорбции ($h/L = 1/3$, h — глубина лунки резорбции, L — длина имплантата) приведены на рис. 2 для нормальной и наклонной нагрузок. При нормальной нагрузке максимальные напряжения наблюдаются у основания лунки, образовавшейся при резорбции костной ткани, в зоне контакта губчатой кости и имплантата, см. рис. 2*a*. При наклонной нагрузке значительные напряжения, вызванные изгибом, возникают также в зоне контакта губчатой кости и основания имплантата, см. рис. 2*b*. Увеличение глубины лунки резорбции приводит к значительному возрастанию максимальных напряжений в губчатой кости.

Анализ влияния резорбции костной ткани на напряженное состояние с учетом формы винтового соединения. Исследование влияния резорбции костной ткани на напряженное состояние вблизи имплантата выполнено на модели винтового соединения имплантата и костной ткани. Внешняя часть конструкции (коронка и абатмент) отсечена, и нагрузка прикладывалась непосредственно к имплантату. Полагалось, что углубления в губчатой кости, образующиеся при внедрении имплантата в костную ткань, соответствуют резьбе на имплантате. Предполагалось также, что на границе имплантата и кости выполняются условия идеального соединения, что соответствует полной остеоинтеграции в системе кость-имплантат. Расчеты выполнены при нормальной и наклонной нагрузках. Модель состояла из трех подобластей (см. рис. 3*ab*). Граничные условия (зоны закрепления) показаны на рисунке тонкой штриховой полосой, также как на рис. 1. Наклонная нагрузка прикладывалась под углом 45° к плоскости сечения имплантата в предположении, что нагрузка, приложенная к верхней части коронки, передается на сечение имплантата.

Расчеты выполнены для трех вариантов глубины резорбции костной ткани — на $1/3$ длины имплантата (рис. 3*ab*), половину длины имплантата и $0,60$ длины имплантата. Распределения напряжений по границе губчатой кости при учете винтовой формы соединения имплантата и кости приведены на рис. 4. При нормальной нагрузке максимальные эквивалентные напряжения наблюдаются у основания лунки, образовавшейся при резорбции кости, в зоне контакта губчатой кости и имплантата. Значительные напряжения возникают также в зоне контакта губчатой кости с нижней частью имплантата (рис. 4*a*). При наклонной нагрузке, ввиду наличия изгиба, интенсивность напряжений значительно возрастает.

Максимальные эквивалентные напряжения также наблюдаются у основания лунки, образовавшейся при резорбции кости, в зоне контакта губчатой кости и имплантата со стороны действия сжимающих напряжений. Напряжения у основания лунки резорбции со стороны растяжения меньше максимальных значений эквивалентных напряжений со стороны сжатия на $3 \dots 5 \%$ (см. рис. 4*b*). В зоне контакта губчатой кости с нижней частью имплантата (рис. 4*b*) эквивалентные напряжения значительно ниже максимальных величин.

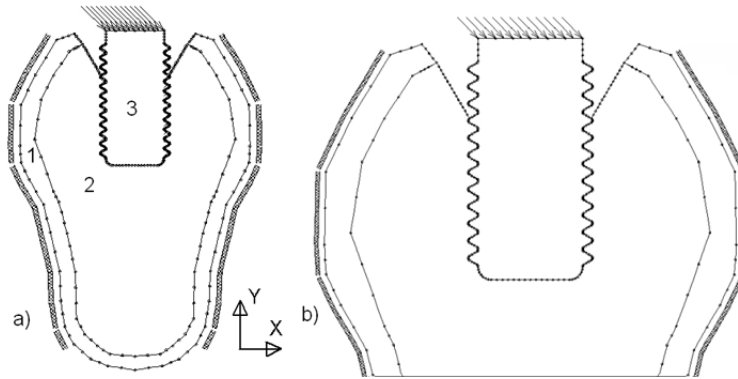


Рис. 3. Расчетная модель ИМЭ. Соединение имплантата и костной ткани, наклонная нагрузка, резорбция на 1/3 высоты имплантата, 3 подобласти, 1740 узлов; а — соединение трех подобластей; б — зона резорбции в увеличенном масштабе

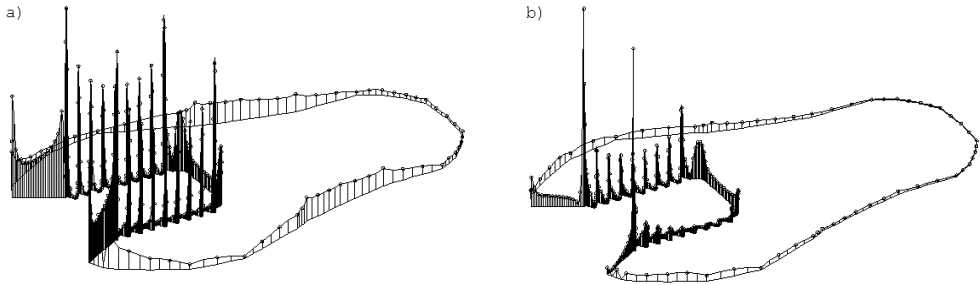


Рис. 4. Интенсивность напряжений σ_i вдоль контура губчатой кости, а — нормальная нагрузка на коронку, максимальные напряжения $\sigma_i = 14,7$ МПа; б — наклонная нагрузка на коронку, максимальные напряжения $\sigma_i = 62,4$ МПа

Работа выполнена по программе госзадания
№ АААА-А17-117021310386-3.

Литература

- [1] Kitamura E., Stegaroiu R., Nomura S., Miyakawa O. Biomechanical aspects of marginal bone resorption around osseointegrated implants: considerations based on a three-dimensional finite element analysis. *Clinical Oral Implants Research Res*, 2004, vol. 15, pp. 401–412.
- [2] Kitamura E., Stegaroiu R., Nomura S., Miyakawa O. Influence of marginal bone resorption on stress around an implant—a three-dimensional finite element analysis. *Journal of Oral Rehabilitation*, 2005, vol. 32 (4), pp. 279–286.
- [3] Wolff J., Narra N., Antalainen A.-K., Valášek J., Kaiser J., Sándor G.K., Marcián P. Finite element analysis of bone loss around failing implants. *Materials & Design*, 2014, vol. 61, pp. 177–184.
- [4] Linetskiy I., Demenko V., Linetska L., Yefremov O. Impact of annual bone loss and different bone quality on dental implant success — A finite element study. *Computers in Biology and Medicine*, 2017, vol. 91, pp. 318–325.

- [5] Bing L., Mito T., Yoda N., Sato E., Shigemitsu R., Han J.M., Sasaki K. Effect of peri-implant bone resorption on mechanical stress in the implant body: In vivo measured load-based finite element analysis. *Journal of Oral Rehabilitation*, 2020, vol. 47 (12), pp. 1566–1573.
- [6] Перельмутер М.Н. Исследование напряженно-деформированного состояния стоматологических имплантатов методом граничных интегральных уравнений. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*, 2018, № 2, с. 83–95.

Bone Resorption Effect on Stress State near Dental Implants

M.N. Perelmuter

perelm@ipmnet.ru

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

The results of numerical modeling by the boundary integral equations method of bone tissue resorption effect on the stress state near screw dental implants are presented. The stress-strain state computation of the implant and surrounding bone tissues was carried out for the plane strain state and consisted of two stages: 1) analysis of the entire implant structure with smoothed screw joint between implant and the surrounding bone tissue; 2) study of the stresses distribution in the screw joint in the contact zone of the implant to the bone tissue. The computations were performed under the assumption that the bone tissue is an isotropic and homogeneous elastic material.

Keywords: implants, screw joint, bone tissues resorption, stress-strain state

*This work was supported by the state program assignment
No. AAAA-A17-117021310386-3.*

References

- [1] Kitamura E., Stegaroiu R., Nomura S., Miyakawa O. Biomechanical aspects of marginal bone resorption around osseointegrated implants: considerations based on a three-dimensional finite element analysis. *Clinical Oral Implants Research Res*, 2004, vol. 15, pp. 401–412.
- [2] Kitamura E., Stegaroiu R., Nomura S., Miyakawa O. Influence of marginal bone resorption on stress around an implant—a three-dimensional finite element analysis. *Journal of Oral Rehabilitation*, 2005, vol. 32 (4), pp. 279–286.
- [3] Wolff J., Narra N., Antalain A.-K., Valášek J., Kaiser J., Sándor G.K., Marcián P. Finite element analysis of bone loss around failing implants. *Materials & Design*, 2014, vol. 61, pp. 177–184.
- [4] Linetskiy I., Demenko V., Linetska L., Yefremov O. Impact of annual bone loss and different bone quality on dental implant success — A finite element study. *Computers in Biology and Medicine*, 2017, vol. 91, pp. 318–325.
- [5] Bing L., Mito T., Yoda N., Sato E., Shigemitsu R., Han J.M., Sasaki K. Effect of peri-implant bone resorption on mechanical stress in the implant body: In vivo measured load-based finite element analysis. *Journal of Oral Rehabilitation*, 2020, vol. 47 (12), pp. 1566–1573.
- [6] Perelmuter M.N. Study of the stress-strain state of dental implants by the method of boundary integral equations. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*, 2018, no. 2, pp. 83–95. (In Russ.).

Расширение эксплуатационных возможностей ленточных пил металлорежущих станков

А.А. Сизо

artstyleone@mail.ru

А.Е. Литвинов

КубГТУ, Краснодар, Россия

Описана структура технологий повышения прочности режущей части пилы. Также в статье представлены результаты анализа существующих технологий (металлизация и наплавка, сварка, методы легирования), позволяющих получать композит с заданными характеристиками. Описываемые технологии в целом характеризуются созданием композитного ламината на основе нанесения покрытий, что при оценке эксплуатационных характеристик вводит дополнительный критерий прочности сцепления. Это, в свою очередь, является основным критерием эксплуатационных характеристик режущего инструмента.

Ключевые слова: наплавка; сварка; методы легирования; резка

В настоящее время в режущем производстве (как в мелкосерийном, так и в крупносерийном) для резки проката и труб из черных и цветных металлов все чаще используются металлорежущие ленточные пилы. Этот способ резки металла, объективно, является наиболее эффективным и производительным. Совершенствование конструкции станков и преимущества резки лезвийным режущим инструментом являются основными факторами, способствующими росту использования таких станков в различных отраслях промышленности.

В машиностроительной отрасли используется эффективный режущий инструмент (РИ), который обеспечивает заданные параметры эффективности, производительности, точности и качества резки, поскольку в общих затратах на процесс резки на отрезных станках стоимость режущего инструмента составляет до сорока процентов.

На сегодняшний день в отечественной станкостроительной промышленности отсутствует производство и разработка лезвийных режущих инструментов для металлорежущих станков, а существующее отрезное оборудование работает исключительно как инструмент для импортного производства, что делает заготовительное производство уязвимым и зависимым. Решение проблемы повышения энергоэффективности процесса резания металлорежущего оборудования и улучшения его производительности возможно за счет снижения нагрузки на резание, использования оригинальных конструкторских решений, направленных на разработку режущего инструмента и анализа геометрических параметров и стабильности существующих инструментов при разработке новых видов резки. Это позволит повысить надежность и точность, функциональные и технологические возможности, производительность обработки деталей, а также снизить затраты на эксплуатацию. Это повысит энергоэффективность отрезного оборудования, снизит стоимость

продукции российского машиностроения и обеспечит технологическую безопасность страны за счет внедрения конкурентоспособного импортозамещающего режущего инструмента для отрезных станков [1, 2].

Современными тенденциями в создании деталей, продуктов инженерного проектирования являются создание композитных изделий.

На сегодняшний день самые популярные биметаллические пилы с зубом изготавливаются из быстрорежущей стали М42 (аналог 11P2M10K8). Эта сталь характеризуется высокой твердостью (HRC 67–68) и термостойкостью до 700 °С. Основой пилы является специальная пружинная сталь, придающая прочность и долговечность. Режущая часть приваривается к основанию с помощью электронного луча. Это позволяет использовать пилы такой конструкции в массовом производстве. Для наиболее сложных условий резания используются ленточные пилы с твердосплавными зубьями при резке на двухстоечных ленточнопильных станках с высокой производительностью. На этом станке можно резать труднообрабатываемые материалы, такие как Инконель, Монель, Хастеллой или сплавы чугуна. Пилы этого типа используются для резки заготовок сплошного поперечного сечения диаметром не менее 100 мм.

Биметаллические пилы имеют длительный срок службы и обладают высокой режущей способностью благодаря специальной технологии производства, когда к основанию из пружинной стали электронным лучом приваривается полоса из быстрорежущей стали (рис. 1).

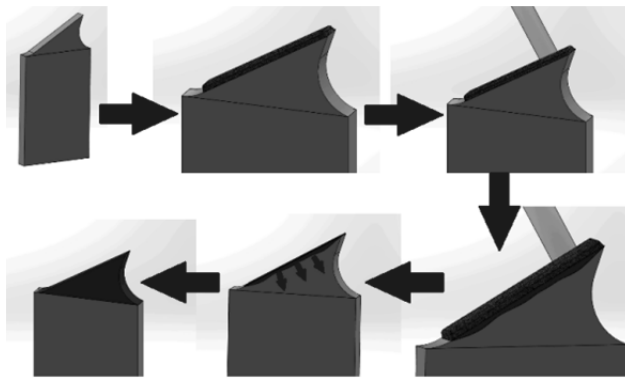


Рис. 1. Производство биметаллических пил

Биметаллические пилы имеют постоянный (нормальный) или переменный (комбинированный) шаг зубьев. Для резки полых профилей используются пилы с переменным шагом зубьев, хотя их также можно использовать для сплошных профилей с небольшой потерей производительности. Преимущество использования пилы с переменным шагом зубьев заключается в снижении шума и вибрации, повышении долговечности, улучшении качества

распила. Наиболее универсальной маркой, используемой в качестве материала для зубьев, является M42. Такие пилы используются для резки большинства сталей. Штампы M51 и M71, как более износостойкие, используются для резки нержавеющей сталей и специальных сплавов.

В качестве аналога пильного полотна из пружинной предлагается материал — сталь 65, которая является альтернативой описанному m42.

Стальное основание 65 обеспечивает режущему инструменту следующие преимущества:

1. Хорошая свариваемость (это необходимо при изготовлении пил для определенного размера станка).
2. Высокая виброустойчивость (обеспечение стабильности процесса резки, уменьшение смещения пилы во время резки, повышение качества реза).
3. Устойчивость к динамическим и переменным нагрузкам (увеличенный срок службы инструмента).

Использование стали 65 в качестве материала для резки пилы невозможно при обработке материалов в современных условиях резки. Для режущей части необходимо использовать материалы с более высокими физико-механическими характеристиками, которые, в свою очередь, не соответствуют требованиям, предъявляемым к полотну [3].

Создание многослойного композита является основной возможной альтернативой инструменту, отвечающему всем необходимым требованиям.

Среди существующих технологий, позволяющих получить композит с заданными характеристиками, есть методы: металлизация и наплавка, сварка, методы легирования.

Структура технологий повышения прочности режущей части пилы показана на рис. 2.

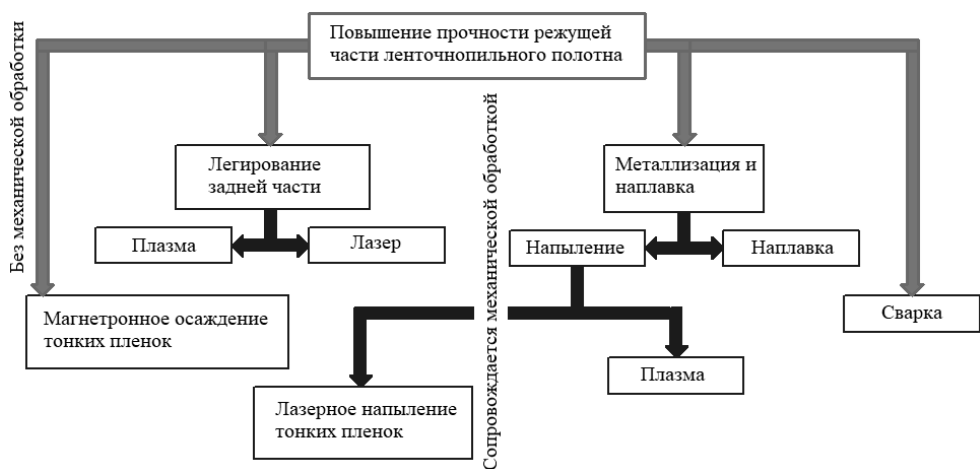


Рис. 2. Технологии для улучшения эксплуатационных характеристик режущей части пилы

Среди технологий напыления наиболее интересными технологиями на сегодняшний день являются: детонационное напыление, холодное газодинамическое напыление и высокоскоростное газопламенное напыление. Однако из-за того что адгезионная прочность не превышает 120 МПа, в результате работы инструмента с покрытиями, полученными этим методом, режущая кромка выдувается из полотна на начальном этапе эксплуатации [4, 5].

Среди существующих технологий осаждения, наиболее подходящих для требований к адгезии, выделяют создание тонкой пленки с использованием лазерного импульсного осаждения и функционального слоя с использованием технологии плазменного напыления [6, 7].

Из этих двух способов технология лазерного импульсного напыления является наиболее предпочтительной, поскольку, в отличие от плазменного напыления, нет необходимости в последующей механической обработке [7].

Технология наплавки неприменима из-за неравномерного нагрева по всей плоскости пильного полотна при неравномерном охлаждении, что приводит к высоким остаточным напряжениям и последующему короблению, что неприемлемо для режущего инструмента такого типа.

Технология сварки (рис. 3) также имеет недостатки для этого типа инструмента, поскольку она также требует снятия остаточных напряжений и последующей механической обработки. Кроме того, существенное ограничение накладывается выбором материала по критерию свариваемости [3].

Магнетронно-ионное осаждение характеризуется очень высокими энергозатратами, кроме того, этот метод уступает другим технологиям по сроку эксплуатации, поскольку позволяет получать в качестве покрытия только тонкие пленки [8].

Описанные технологии в целом характеризуются созданием композитного ламината на основе нанесения покрытий, что при оценке эксплуатационных характеристик вводит дополнительный критерий прочности сцепления. Это, в свою очередь, является основным критерием эксплуатационных характеристик режущего инструмента.

Наиболее эффективной технологией, позволяющей повысить характеристики режущей части инструмента, является легирование (рис. 4).

Что касается ленточных пил, то источником легирования будет лазер вдоль задней поверхности и плазма.

Анализ условий работы режущего инструмента ленточнопильных отрезных станков показал, что пилы испытывают сложный вид нагружения. Так, при эксплуатации полотна ленточнопильного отрезного станка работает на изгиб по трем плоскостям, скручивание происходит вдоль центра масс полотна пилы, что позволяет сделать вывод о сложном усталостном нагружении пилы. Помимо этого во время резания зубья режущей части пилы испытывают также знакопеременную нагрузку и работают в условиях трения, причем процесс резания сопровождается повышением температуры в зоне

резания, что приводит к нагреву обрабатываемого материала и самого режущего инструмента. Таким образом, это приводит к тому, что на трение также работает и полотно пилы. В процессе резания пила также испытывает вибрационные нагрузки, а зубья режущей части могут испытывать ударную нагрузку. Из-за неоднородности обрабатываемого материала пилы ленточно-отрезных станков также часто испытывают и временные перегрузки. Схемы нагружения пилы показаны на рис. 5–7.

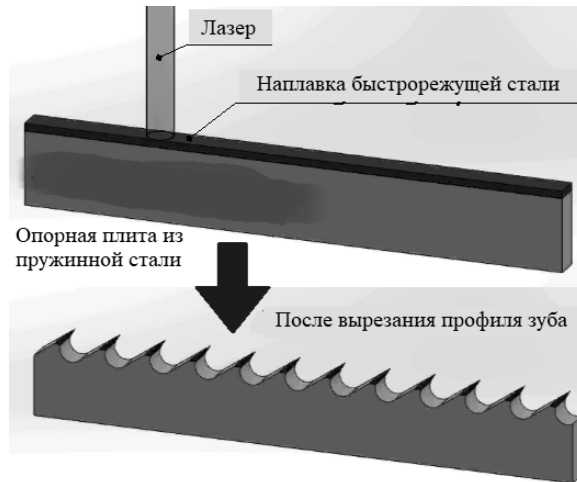


Рис. 3. Производство биметаллического режущего инструмента с использованием технологии лазерной сварки

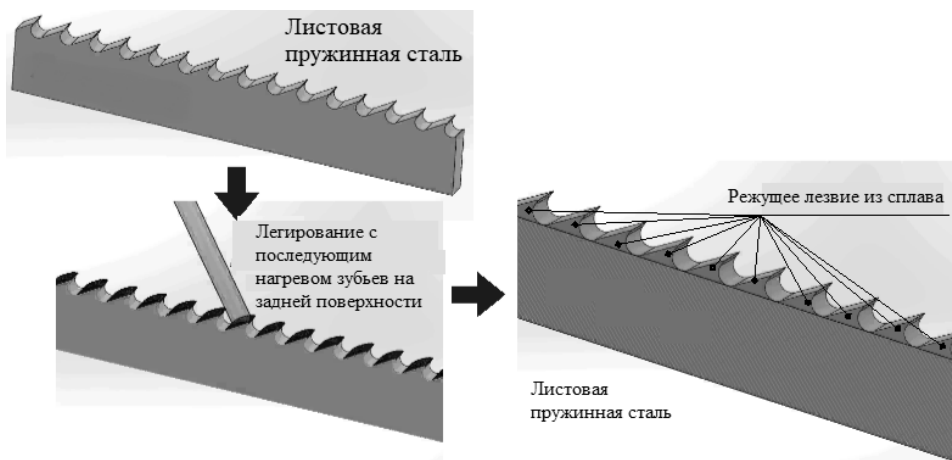


Рис. 4. Схема зонального легирования с использованием высокоэнергетических технологий

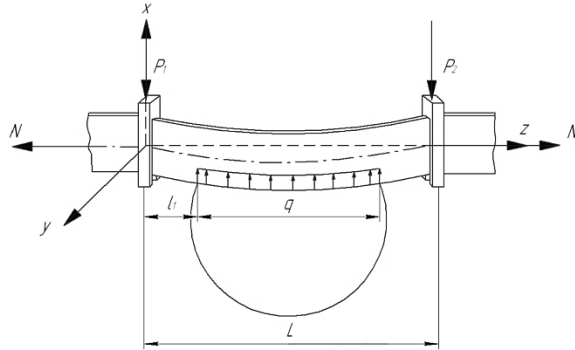


Рис. 5. Схема нагружения пилы в вертикальной плоскости: L — участок пилы между направляющими; q — распределенная вертикальная нагрузка, постоянная по величине по линии реза; S — шаг пилы в м; z — вдоль пилы, y — перпендикулярно плоскости пилы, x — в плоскости пилы перпендикулярно оси z ; P_1 и P_2 — вертикальные силы, возникающие в направляющих в результате действия распределенной нагрузки; N — растягивающая сила

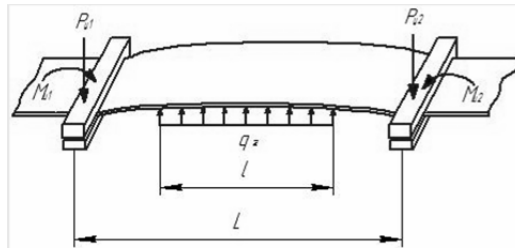


Рис. 6. Схема нагружения пилы в горизонтальной плоскости: q_z — небольшая горизонтальная составляющая распределенной силы резания, действующая на зубья пилы; l — линия реза; P_{y1}, P_{y2} — силы реакций; $M_{и1}, P_{и2}$ — моменты реакций

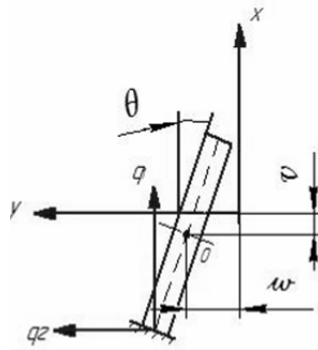


Рис. 7. Схема нагружения пилы на кручение: v — вертикальная деформация средней линии; w — деформация средней линии

Анализ условий работы пилы проводился как экспериментальным путем, так и на программном комплексе ANSYS (показано на рис. 8–12).

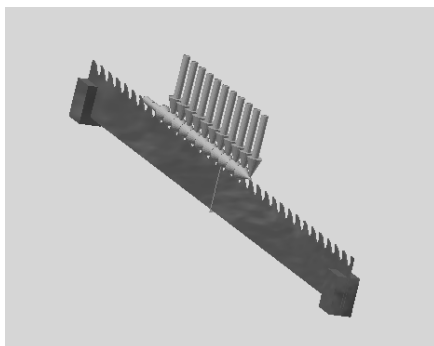


Рис. 8. Моделирование нагружения

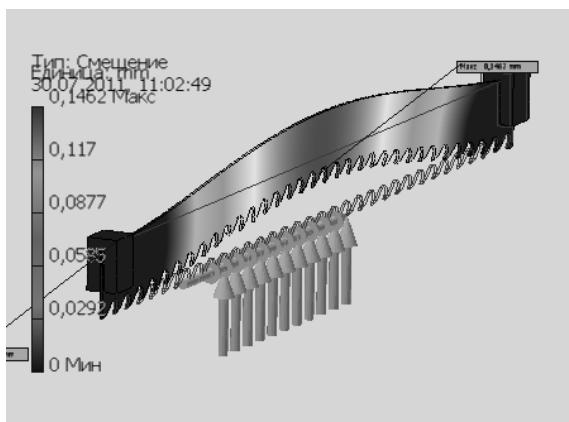


Рис. 9. Результаты моделирования нагружения

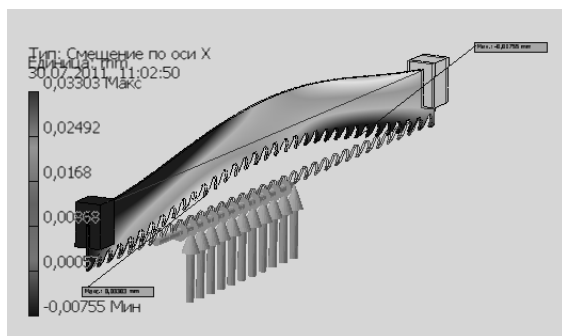


Рис. 10. Результаты моделирования нагружения.
Смещение по координате x

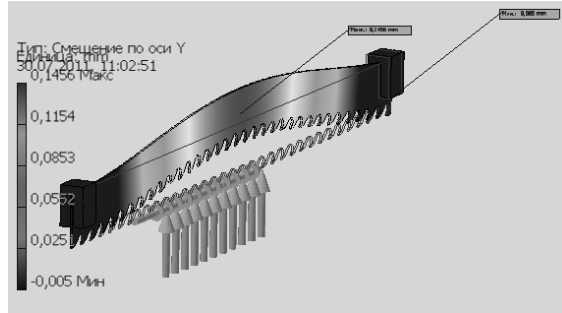


Рис. 11. Результаты моделирования нагружения.
Смещение по координате y

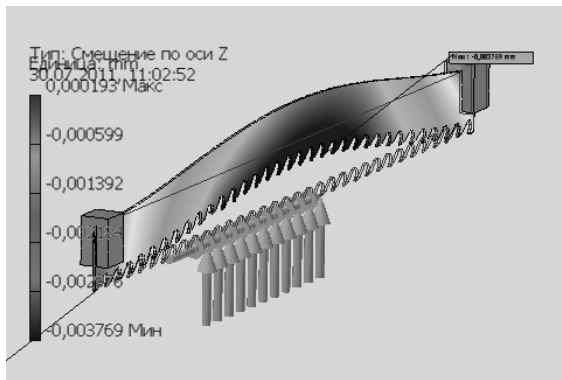


Рис. 12. Результаты моделирования нагружения.
Смещение по координате z

Согласно полученным данным, был сделан вывод, что наиболее уязвимым местом ленточной пилы является место, где плотно сваривается в кольцо, поскольку сварные швы плохо работают при переменной нагрузке. Однако альтернативы на сегодняшний день не существует, поскольку согласно требованиям технологичности место стыка не должно иметь выступов, накладок и т. д. Поэтому, чтобы снизить чувствительность к переменным нагрузкам этого участка ленточной пилы, используются различные методы термической или термомеханической обработки для нормализации структуры в сварном шве и зонах сварки. Кроме того, это позволяет уменьшить остаточные напряжения, возникающие после сварки в результате разной структуры материала из-за различных температур нагрева по мере удаления от сварного шва, которые могут соответствовать температурам закалки, отпуска, отжига и т. д. Из-за разницы в требованиях к физико-механическим свойствам пильного полотна и режущей части пилы возникает необходимость в изготовлении пилы, имеющей составную структуру, которая позволяла бы получать пилу, удовлетворяющую всем условиям,

предъявляемым как к полотну, так и к режущей части. Изготовление пилы из единого материала, как для режущей части, так и для полотна с последующей термической и термомеханической обработкой, не позволяет достичь результата, отвечающего требованиям, предъявляемым к современным режущим инструментам. Таким образом, альтернативой было изготовление биметаллической пилы, которая состояла бы из двух материалов — один из которых используется для изготовления полотна, а другой приваривается с помощью лазерной сварки к полотну и используется в качестве материала зубьев режущей части пилы. Однако помимо ограничений на свариваемость материалов существует ограничение в технологии, поскольку в результате сложной нагрузки, а также влияния температуры на пилу, в результате трения о заготовку, место сварки полотна и режущей части также является уязвимым местом. Альтернативным решением для создания биметаллического композита для пил может стать технология создания покрытий на режущей части пилы из специальных материалов. Однако существующие технологии, позволяющие получать такие покрытия, также имеют недостатки. В качестве недостатка можно отметить низкую адгезию и небольшую толщину такого покрытия. Таким образом, наиболее подходящей технологией создания биметаллического композита для пилы из цельного материала является технология локального легирования, которая позволяет изготовить пилу из материала, удовлетворяющего требованиям полотна по своим физико-механическим характеристикам. Как правило, для этой цели используются пружинные стали, среди которых есть сталь 65, которая, помимо своей стойкости к переменным нагрузкам, также обладает высокой виброустойчивостью.

Возникающая в процессе эксплуатации вибрация инструмента отрицательно сказывается не только на работе самого оборудования, сроке службы, точности обработки и т. д., но и на сопротивлении самого инструмента, поскольку вибрации можно отнести к форме переменных нагрузок, изменяющихся со временем с высокой частотой вращения, что ускоряет процесс усталостного разрушения инструмента [9]. Также вибрации могут ускорить распространение трещин в инструменте и способствовать накоплению дислокаций с образованием микротрещин и их дальнейшим ростом. Во время вибрации инструмент также нагревается, а, как известно, физико-механические свойства материала изменяются с повышением температуры. Все это указывает на необходимость избегать возникновения вибрации в приборе, дополнительно внедряя системы демпфирования вибрации, а также в случаях, когда нельзя избежать использования виброустойчивых материалов [9, 10].

Для изготовления полотен ленточной пилы в качестве правил применяются материалы, используемые в пружинах и рессорах, которые способны поглощать и гасить возникающие колебания, однако использование этих материалов для режущей части инструмента неприемлемо, поскольку такие ма-

териалы не обладают достаточными характеристиками для режущей части инструмента [3].

В дальнейшем следует проводить локальное легирование режущей части пилы с последующей термической и термомеханической обработкой, таким образом можно будет получить режущую часть, отвечающую всем требованиям к современному режущему инструменту по своим характеристикам. В свою очередь, применение технологии локального легирования позволяет проводить его, благодаря уникальным особенностям, таким как предварительная зачистка, что в свою очередь позволит проводить грубую обработку материала с более низкими физическими и технологическими свойствами, что облегчит процесс изготовления пилы, и, как следствие, сделать более технологичным процесс производства ленточных пил.

*Работа выполнена при поддержке Совета по грантам
Президента Российской Федерации (свидетельство № МК-6201.2018.8).*

Литература

- [1] Киселев С.В., Блахин А.В., Дулевич А.Ф. Ленточные пилы с высокой прочностью. *Вестник БГТУ*, 2007, т. 4, с. 24–27.
- [2] Литвинов А.Е. Повышение долговечности инструмента и точности обработки на ленточнопильных станках. *Российские инженерные исследования*, 2016, т. 36, с. 760–761. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X16090124>
- [3] Бледнова З.М., Русинов П.О., Балаев Э.Ю. Количественная оценка наследственных закономерностей формирования и трансформации поверхностного слоя из многокомпонентных материалов с памятью формы при высокоэнергетическом воздействии. *Материалы сегодня: труды*, 2017, с. 4652–4657. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.04.046>
- [4] Балдаев Л.Х., Борисов В. *Газотермическое напыление*. Москва, Маркет ДС, 2007, с. 344.
- [5] Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление. Москва, Машиностроение, 1985, с. 240.
- [6] Ласкин Г.П., Кузнецов А.П. Моделирование процесса ионно-плазменного легирования. *Вестник ТумГУ*, 2010, т. 6, с. 64–67.
- [7] Путилин В.А., Камашев А.В., Путилин А.В. *Легирование поверхности металлов при применении коротковолнового лазера*. Москва, Машиностроение, 2016, с. 344.
- [8] Гусейнов М.К., Курбанов М.К., Билалов Б.А., Сафаралиев Г.К. Магнетронное осаждение тонких пленок твердого раствора (SiC)_{1-x}(AlN)_x. *Физика и технология полупроводников*, 2010, т. 44, с. 841–844.
- [9] Рублевская Е.В., Комарова П.А., Щербакова А.В., Хуснутдинов Т.Д., Раменская Е.В. Анализ параметров процесса резки ленточными пилами. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2017, т. 1, с. 35–36.
- [10] Astakhov V.P. *Tribology of Metal Cutting*. Elsevier Science, 2006.

Expanding the Operational Capabilities of Band Saws of Metal-Cutting Machines

A.A. Sizo

A.E. Litvinov artstyleone@mail.ru

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

The article describes the structure of technologies for increasing the strength of the cutting part of the saw. The article also presents the results of analysis of existing technologies (metallization and surfacing, welding, doping methods), allowing one to obtain a composite with specified characteristics. The described technologies are generally characterized by the creation of a composite laminate based on the application of coatings, which, in assessing the performance, introduces an additional criterion for adhesion strength. This, in turn, is the main criterion for the operational performance of the cutting tool.

Keywords: surfacing; welding; doping methods; cutting

References

- [1] Kiselev S.V., Blakhin A.V., Dulevich A.F. Band saws with high strength. *Bulletin of BSTU*, 2007, vol. 4, pp. 24–27. (In Russ.).
- [2] Litvinov A.E. Increasing tool life and processing accuracy on band saw machines. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, pp. 760–761. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X16090124> (In Russ.).
- [3] Blednova Z.M., Rusinov P.O., Balaev E.Yu. Quantitative assessment of hereditary patterns of formation and transformation of the surface layer from multicomponent materials with shape memory under high-energy exposure. *Materials today: works*, 2017, pp. 4652–4657. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.04.046> (In Russ.).
- [4] Baldaev L.Kh., Borisov V. *Thermal spraying*. Moscow, Market DS, 2007, 344 p. (In Russ.).
- [5] Hasui A., Morigaki O. Surfacing and spraying. Moscow, Mashinostroenie, 1985, 240 p. (In Russ.).
- [6] Laskin G.P., Kuznechov A.P. Simulation of the process of ion-plasma doping. *Bulletin of TumGU*, 2010, vol. 6, pp. 64–67. (In Russ.).
- [7] Putilin V.A., Kamashev A.V., Putilin A.V. *Doping of the surface of metals using a short-wave laser*. Moscow, Mashinostroenie, 2016, p. 344. (In Russ.).
- [8] Guseynov M.K., Kurbanov M.K., Bilalov B.A., Safaraliev G.K. Magnetron deposition of thin films of (SiC)_{1-x}(AlN)_x solid solution. *Physics and technology of semiconductors*, 2010, vol. 44, pp. 841–844. (In Russ.).
- [9] Rublevskaya E.V., Komarova P.A., Shcherbakova A.V., Khusnutdinov T.D., Ramenskaya E.V. Analysis of the parameters of the cutting process with band saws. *Actual problems of aviation and astronautics*, 2017, vol. 1, pp. 35–36. (In Russ.).
- [10] Astakhov V.P. *Tribology of Metal Cutting*. Elsevier Science, 2006.

Расчет на прочность многослойной композитной прямоугольной пластинки с дискретными опорами

Е.В. Славкина

slavkina@bmstu.ru

М.В. Астахов

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассматриваемая трехслойная композитная прямоугольная пластинка, представляющая собой сэндвич-структуру, оперта в семи точках по контуру (в пяти точках по длинной стороне, в двух угловых точках на противоположной стороне, два края являются свободными), нагружена нормальной распределенной нагрузкой и сжимающими силами по длинным сторонам. Численное решение получено с помощью конечно-элементного анализа с использованием пакетного комплекса ANSYS в виде эпюр напряжений и деформаций. Аналитическая оценка «снизу» и «сверху» точности численного решения проводится на основе уравнений теории упругости и методов, предложенных в [1]. На основании сравнения результатов расчета получена картина напряженно-деформированного состояния трехслойной композитной пластинки

Ключевые слова: композитная трехслойная пластинка, напряженно-деформированное состояние

Литература

- [1] Александров А.Я. (ред.), Брюккер Л.Э., Куршин Л.М. (ред.), Прусаков А.П. *Расчет трехслойных панелей*. Москва, Оборонгиз, 1960, 271 с.

Strength Analysis of a Multilayer Composite Rectangular Plate with Discrete Supports

E.V. Slavkina

slavkina@bmstu.ru

M.V. Astahov

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The considered three-layer composite rectangular plate, which is a sandwich structure, is supported at seven points along the contour (at five points along the long side, at two corner points on the opposite side, two edges are free), loaded with a normal distributed load and compressive forces along the long sides. The numerical solution was obtained using finite element analysis using the ANSYS package complex in the form of stress and strain diagrams. Analytical assessment “from below” and “from above” of the accuracy of the numerical solution is carried out on the basis of the equations of the theory of elasticity and the methods proposed in [1]. Based on a comparison of the calculation results, a picture of the stress-strain state of a three-layer composite plate was obtained.

Keywords: composite three-layer plate, stress-strain state

References

- [1] Alexandrov A.Ya. (ed.), Bryukker L.E., Kurshin L.M. (ed.), Prusakov A.P. *Calculation of three-layer panels*. Moscow, Oborongiz, 1960, 271 p. (In Russ.).

Моделирование установки временных внутрикостных имплантатов при помощи нативной модели нижней челюсти

Т.В. Полякова^{1,2} **tpolyakova@bmstu.ru**

С.С. Гаврюшин²

¹ ИКИ РАН, Москва, Россия

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрен пример восстановления геометрии конструкции по нативной модели нижней челюсти. В качестве исходных данных кафедры «Кафедра пропедевтики стоматологических заболеваний» МГМСУ предоставила электронный слепок и томограмму нативной модели нижней челюсти, по которой была получена трехмерная геометрия конструкции. Расчеты были выполнены в среде прикладного программного конечно-элементного комплекса ANSYS Workbench.

Ключевые слова: временный имплантат, метод конечных элементов, фасетная модель, временная установка имплантатов, остеоинтеграция

Прогресс в имплантологии был направлен на повышение комфорта пациента за счет сокращения времени лечения и достижения эстетической и функциональной реабилитации как можно быстрее. Хотя в значительной степени этот аспект был достигнут за счет использования концепции немедленной нагрузки, она не может применяться ко всем клиническим ситуациям. Есть еще много клинических случаев, когда пациенту приходится проходить через период реабилитации после хирургической процедуры, в течение которого зачастую используются мостовидные временные протезы. Был рассмотрен пример такой реставрации с помощью фиксации временного протеза на временных имплантатах.

Временные имплантаты представляют собой имплантаты узкого диаметра, которые были разработаны для поддержки временных фиксированных протезов на этапе остеоинтеграции окончательных имплантатов и обычно устанавливаются одновременно с постоянными имплантатами. Они размещаются в челюсти во время одноэтапной хирургической процедуры и предназначены для немедленной нагрузки. Обычно они располагаются между постоянными имплантатами, при этом расстояние между имплантатами должно быть не менее 2 мм, до соседнего зуба — не менее 1,5 мм. В случае частичной адентии используются два или три временных имплантата. Количество промежуточных звеньев может быть даже ограничено двумя имплантатами для дистальных областей челюсти, если ставится временный мостовидный

протез [1]. Пациент может хорошо пережевывать пищу и нормально функционировать в период реабилитации, длящийся от 3 до 6 месяцев, и в тоже время иметь хорошую эстетику и фонетику при помощи хороших временных протезов, зафиксированных на таких имплантатах. Временные имплантаты могут также применяться на этапе восстановления кости аугментационными материалами при использовании барьерных мембран. После приживления постоянных имплантатов изделия удаляются (в конце предварительной фазы), либо используются в качестве дополнительной опоры для протезов. Постоянные имплантаты затем восстанавливаются по основному плану лечения.

Временная имплантация начала развиваться в 1970 годы, когда д-р Джек Уиммер из Park Dental (Park Dental Studies, Нью-Йорк) предложил конструкцию в виде винта Лью. Д-р Виктор Сендакс позже разработал Sendax систему мини-дентальной имплантации (Imtec Corp, Ardmore, OK). Работы Пола Петрунгаро с системой Dentatus (Dentatus AB, Хагертен, Швеция) расширили эту концепцию [2].

Некоторые из коммерчески доступных систем временных имплантатов:

а) временная система имплантатов для немедленной нагрузки (Immediate Provisional Implant System — IPI, Nobel Biocare, Йорба Линда, Калифорния, США);

б) модульная временная система имплантатов (Modular Transitional Implant System — МТИ, Dentatus, Нью-Йорк, штат Нью-Йорк, США);

в) мини-система зубных имплантатов (Mini Dental Implant System — MDI, Imtec, Ардмор, Оклахома, США);

г) временный имплантат (Temporary Implant, Bicon, Boston, MA).

Временные имплантаты обычно изготавливаются из технически чистого титана или титанового сплава и представляют собой цельные имплантаты с компонентами коронки и корня.

В качестве основной цели работы можно выделить разработку методики расстановки временных имплантатов в челюсти с учетом прочностных характеристик кости и определения максимальной нагрузки на имплантат, принимая во внимание описанные ранее ограничения на область установки имплантата.

Введение в инженерную практику математического аппарата и прикладного инструментария для геометрического моделирования объектов сложной пространственной формы, восстанавливаемых NURBS-поверхностями по фасетной сетке замкнутой однородной оболочки в случае, когда границы тел задаются неявно заданными функциями, позволило нам быстро и наиболее точно восстанавливать геометрию конструкции на основе электронных слепков и высокоточных томографических снимков.

Было рассмотрено две модели мостовидных протезов для концевой дефекта зубного ряда: временный мостовидный протез, имеющий ножки (рис. 1), НДС конструкции которого было оценено ранее в статье [3], и случай, когда временный мостовидный протез из полимерного материала опира-

ется на «десневую маску» — специального вида покрывной протез, изготовленный под определенным тип расстановки имплантатов (рис. 2).

Для возможности оптимизации конструкции рассматривается упрощенная параметрическая модель с использованием мультиагентного подхода. В качестве агента выступает отдельный имплантат.

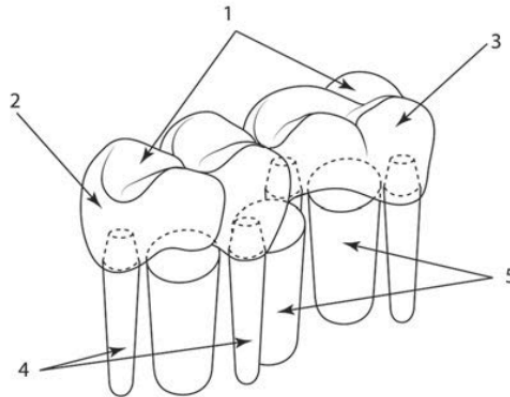


Рис. 1. Временный мостовидный зубной протез, опирающийся на временные дентальные имплантаты: 1 — конструкция временного зубного протеза; 2, 3 — коронки протеза, опирающиеся на временные дентальные имплантаты 4; 5 — двухэтапные внутрикостные дентальные имплантаты

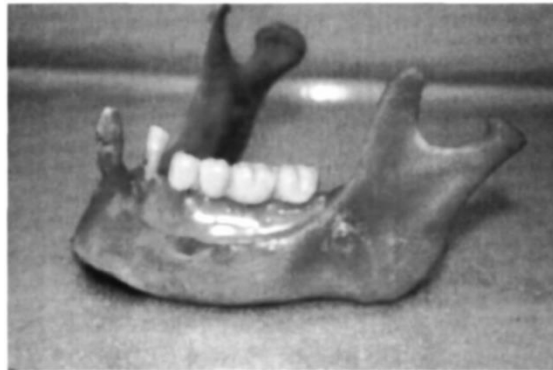


Рис. 2. Временный мостовидный протез, опирающийся на временные имплантаты, установленные на нативной модели нижней челюсти

Для части конструкции — временного имплантата, зафиксированного в челюсти, была написана программа на языке Python, позволяющая оценить НДС конструкции, основные нагрузки на имплантат, а также задать точное позиционирование имплантата в челюсти (рис. 3, 4). В качестве основных

характеристик имплантата можно выделить длину его внутрикостной части и верхнюю часть, фиксируемую в протезе. Имплантат характеризуется материалом с модулем Юнга, коэффициентом Пуассона и пределом упругости при сжатии. Кортикальная и губчатая кость также задаются своими параметрами материала. Кортикальная кость имеет определенную толщину. Имплантат имеет три поступательных и три вращательных степени свободы. Таким образом, максимальная нагрузка на имплантат определяется состоянием костной ткани (шириной кортикальной кости и плотностью кортикальной и губчатой кости), положением имплантата в челюсти, его длиной. На этой модели определяли максимальную нагрузку на имплантат, используя критерий Мизеса. Также по ней определяются жесткостные характеристики временного имплантата. Далее имплантаты можно объединить в супраструктуру. Протез можно моделировать балочным элементом. Оптимальное расположение имплантатов определяется на основании минимизации напряжений в конструкции. Шесть величин жесткости определяются из параметрической задачи, описанной для одиночного имплантата. Рассматриваем наиболее неблагоприятный способ нагружения, при воздействии на протез точечной нагрузки.

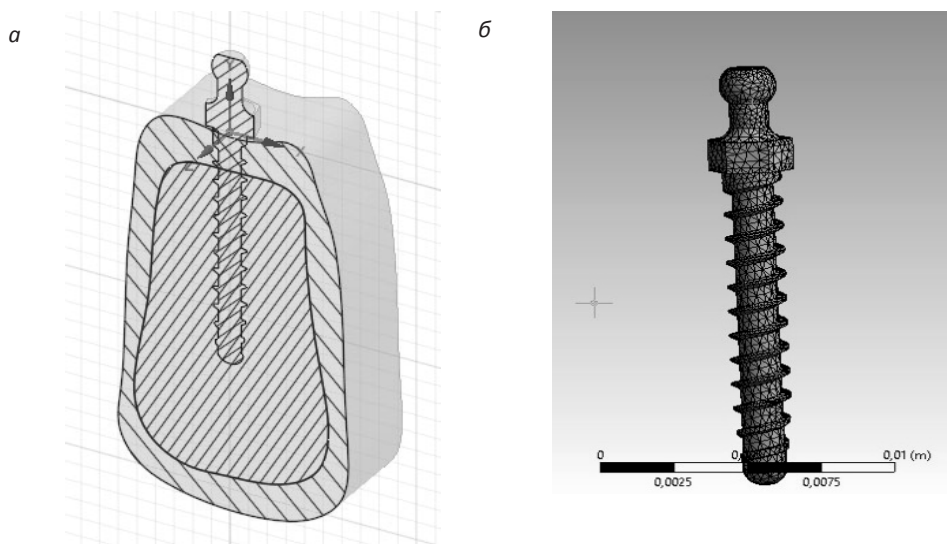


Рис. 3. Модель имплантата в блоке:

- а — модель «временный имплантат в челюсти» в разрезе;
б — имплантат длиной 10 мм (модель параметрическая)

По геометрической модели нативной нижней челюсти были получены картины распределения напряжений и деформаций в области имплантатов. Напряжения по Мизесу в кости не превышают критический уровень с существенным запасом прочности (рис. 5).

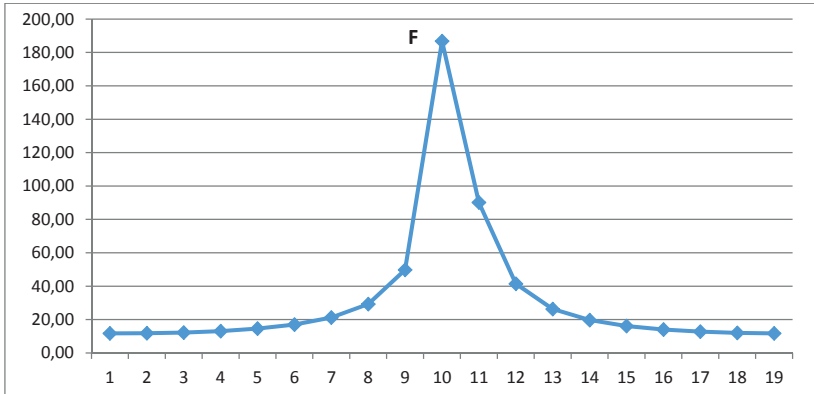


Рис. 4. Пример расчета для определения максимального значения нагрузки в плоскости XY в зависимости от угла приложения силы

Таким образом, рассмотрен алгоритм оптимизации расстановки временных имплантатов и методика протезирования, которая может быть использована на этапе временного протезирования зубов и зубных рядов до этапа ортопедической реабилитации стоматологических пациентов постоянными несъемными зубными протезами.

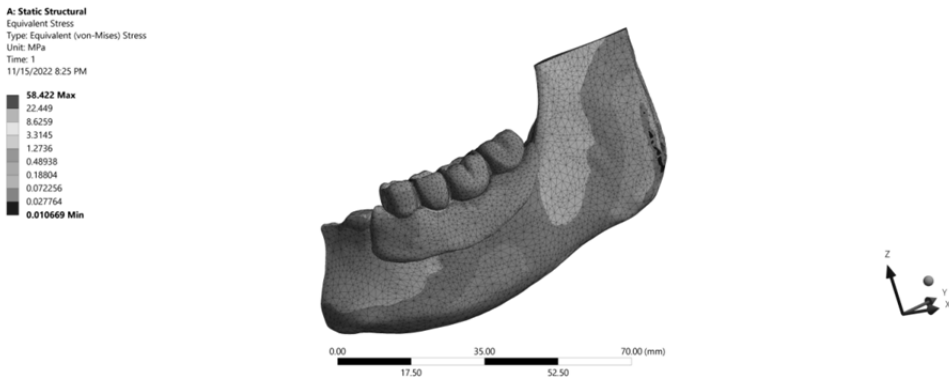


Рис. 5. Эквивалентные напряжения по Мизесу (логарифмическая шкала)

Литература

- [1] Babbush C.A. Provisional Implants: Surgical and prosthetic aspects. *Implant Dent*, 2001, vol. 10, pp. 113–20.
- [2] Kheur M. G. Transitional implants: An asset to implantology. *Journal of Interdisciplinary Dentistry*, Jan–Jun 2011, vol. 1, iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.4103/2229-5194.77185> p.4-9.
- [3] Полякова Т.В., Гаврюшин С.С., Арутюнов С.Д. Моделирование планирования установки временных имплантатов под опору прототипов мостовидных зубных протезов на период остеоинтеграции двухэтапных дентальных имплантатов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 12, с. 1–18. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-12-1569>

Simulation the Installation of Transitional Intraosseous Implants using a Native Model of the Lower Jaw

T.V. Poliakova^{1,2}

tpolyakova@bmstu.ru

S.S. Gavriushin²

¹ IKI, Moscow, Russia

² BMSTU, Moscow, Russia

An example of restoring the geometry of the construction according to the native model of the lower jaw is considered. As initial data, the Department of Propaedeutics of Dental Diseases of MSUMD provided an electronic cast and a tomogram of the native model of the lower jaw, from which the three-dimensional geometry of the structure was obtained. The calculations were performed in the environment of the ANSYS Workbench finite element software application.

Keywords: transitional implant, finite element method, facet model, temporization, osseointegration

References

- [1] Babbush C.A. Provisional Implants: Surgical and prosthetic aspects. *Implant Dent*, 2001, vol. 10, pp. 113–120.
- [2] Kheur M. G. Transitional implants: An asset to implantology. *Journal of Interdisciplinary Dentistry*, Jan-Jun 2011, vol. 1, iss. 1, pp. 4–9. DOI: <https://doi.org/10.4103/2229-5194.77185>
- [3] Polyakova T.V., Gavryushin S.S., Arutyunov S.D. Modeling the planning of the installation of temporary implants under the support of prototypes of dental bridges for the period of osseointegration of two-stage dental implants. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, no. 12. p. 1-18. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-12-1569>

Моделирование метода торк-аут для измерения адгезивной прочности на основе модели связной зоны

Чжан Цинхуэй

cinhuey1@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Исследована возможность измерения адгезивной прочности композиционных материалов методом торк-аута. Проведен механический анализ клеевых соединений «отверстие — вал» с использованием метода конечных элементов. Использована Модель связной зоны для моделирования роста повреждений в клеевом соединении. Разработан метод анализа для использования в будущей разработке стенда для измерения адгезивной прочности.

Ключевые слова: адгезивная прочность, моделирование, модель связной зоны

Литература

- [1] Форс Ф. *Анализ соединений металла с композитным клеем в космической технике*. 2010.
- [2] Петрова А. П., Малышева Г. В. *Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги*. Москва, ВИАМ, 2017.

Simulation of the Torque-out Method for Measuring Adhesive Strength Based on the Cohesive Zone Model

Zhang Qinghui **cinhuey1@gmail.com**

BMSTU, Moscow, Russia

The possibility of measuring the adhesive strength of composite materials by the torque-out method has been investigated. The mechanical analysis of adhesive joints “hole-shaft” using the finite element method has been carried out. A cohesive zone model was used to simulate damage growth in an adhesive joint. An analysis method was developed for use in the future development of an adhesive strength measurement bench.

Keywords: adhesive strength, modeling, model of the cohesive zone

References

- [1] Fors F. *Analysis of Metal to Composite Adhesive Joins in Space Applications*, 2010.
- [2] Petrova A.P. *Glues, glue bonding agents and glue prepregs*, 2017.

Расчет амплитудных значений эквивалентных напряжений во вращающемся дисковом режущем инструменте

А.Ю. Карпачев¹ **karpachevay@bmstu.ru**

Ю.В. Берчун^{1,2}

Д.Л. Рабкин^{1,2}

А.А. Гамарник¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

² ИМАШ РАН, Москва, Россия

Рассмотрено трехмерное вращение режущего диска в роботизированной системе. Установлена связь между напряжением в диске и кинематикой сферического движения. Предложены методы расчета усталостной прочности режущего диска в роботизированной системе.

Ключевые слова: круглая пила, силы инерции, метод конечных разностей

Литература

- [1] Карпачев А.Ю., Воякин А.С. Усталостная прочность дискового режущего инструмента роботизированного оборудования. *Вестник машиностроения*, 2020, № 10, с. 58–62.
- [2] Берчун Ю.В., Бурков П.В. и др. Итерационный метод решения СЛАУ на основе механической аналогии. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 8, с. 14–31.

Compute of the Equivalent Stresses Amplitude in a Rotating Disk Cutting Tool

A.Yu. Karpachev¹

karpachevay@bmstu.ru

Yu.V. Berchun^{1,2}

D.L. Rabkin^{1,2}

A.A. Gamarnik¹

¹ BMSTU, Moscow, Russia

² IMASH RAS, Moscow, Russia

The three-dimensional rotation of a cutting disk in a robot system is considered. A relation is established between the stress in the disk and the kinematics of spherical motion. Methods for calculating the fatigue strength of a cutting disc in a robotic system are proposed.

Keywords: circular saw, inertial forces, finite difference method

References

- [1] Karpachev A.Yu., Voyakin A.S. Fatigue strength of disk cutter in robot systems. *Vestnik mashinostroenia*, 2020, no. 10, pp. 58–62. (In Russ.).
- [2] Berchun Yu.V., Burkov P.V. etc. Iterative method of LAE systems solving based on mechanical analogy. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie BMSTU*, 2015, no. 8, pp. 14–31. (In Russ.).

Зарастание вязкоупругой стареющей пластины, ослабленной треугольным отверстием

М.Н. Михин¹

Т.Б. Белова¹

О.В. Белова²

Ovbelova@bmstu.ru

¹ Филиал РГГУ, Домодедово Россия

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Представлена задача об исследовании напряженного деформируемого состояния растянутой вязкоупругой стареющей пластины, имеющей треугольное отверстие со скругленными углами, в процессе зарастания по закону подобия. Рассмотрены воз-

никающие классические и неклассические начально-краевые задачи механики деформируемого твердого тела. Предложены методы решения таких задач, основанные на приведении неклассических задач наращивания вязкоупругих стареющих тел к задачам теории упругости с некоторым параметром и восстановлении истинных характеристик напряженно-деформированного состояния тел при помощи полученных формул расшифровки.

Ключевые слова: растущее тело, граница роста, остаточное напряжение, вязкоупругость, стареющий материал

Исследуется напряженно-деформируемое состояние вязкоупругой однородной пластины Ω_1 , ослабленной отверстием L_1 , имеющим форму правильного треугольника (со скругленными углами), которое до момента приложения нагрузки τ_0 пластина свободна от напряжений.

Пусть контур отверстия свободен от внешних напряжений и пусть напряженное состояние на бесконечности представляет собой растяжение, величины P , в направлении параллельном оси Ox_1 .

В момент времени $\tau_1 \geq \tau_0$ начинается непрерывное наращивание (аддитивное изготовление) тела элементами, изготовленными одновременно с ним. При этом новые приращиваемые элементы не напряжены. Наращивание происходит таким образом, что отверстие уменьшается по закону подобия, т. е. непрерывно меняющаяся граница (граница роста) $L(t)$ имеет форму равностороннего треугольника со скругленными углами.

Будем считать, что граница роста не загружается в процессе аддитивного изменения тела и момент приложения нагрузки к приращиваемым элементам $\tau_0 = \tau_0(x_1, x_2)$ совпадает с моментом их присоединения к растущему телу $\tau^* = \tau^*(x_1, x_2)$.

В момент $\tau_2 \geq \tau_1$ аддитивное изготовление тела прекращается, и с этого момента оно занимает область Ω_1 ограниченную контуром L_2 , $L_1 = L(\tau_2) = L_\sigma(\tau_2) \cup L^*(\tau_2)$.

Краевая задача для основного (исходного) вязкоупругого однородного стареющего тела на интервале времени $[\tau_0, \tau_1]$ представляет собой классическую задачу теории вязкоупругости.

Начально-краевую задачу для аддитивно изготавливаемого вязкоупругого тела на интервале времени $t \in [\tau_1, \tau_2]$ составляют:

уравнения равновесия

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x_2} = 0; \quad (1)$$

соотношения Коши между скоростями деформации $D_{ij} = \partial \varepsilon_{ij} / \partial t$ и скоростями перемещений $v_i = \partial u_i / \partial t$

$$D_{11} = \frac{\partial v_1}{\partial x_1}, D_{22} = \frac{\partial v_2}{\partial x_2}, D_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_1}{\partial x_2} + \frac{\partial v_2}{\partial x_1} \right); \quad (2)$$

уравнения состояния в форме

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= 2G(\mathbf{I} + N_{\tau_0}) \left(\frac{2K}{K+1} \varepsilon_{11} + \frac{K-1}{K+1} \varepsilon_{22} \right); \\ \sigma_{22} &= 2G(\mathbf{I} + N_{\tau_0}) \left(\frac{K-1}{K+1} \varepsilon_{11} + \frac{2K}{K+1} \varepsilon_{22} \right); \\ \sigma_{12} &= 2G(\mathbf{I} + N_{\tau_0}) \varepsilon_{12}; \\ \tau_0(x_1, x_2) &= \begin{cases} \tau_0, & (x_1, x_2) \in \Omega_1; \\ \tau^*(x_1, x_2), & (x_1, x_2) \in \Omega^*(t); \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

$$(\mathbf{I} + N_{\tau_0})^{-1} = (\mathbf{I} - \mathbf{L}_{\tau_0}), \quad 2G = \frac{E}{1+\nu}, \quad K = \frac{1}{1-2\nu};$$

$$\mathbf{L}_s f(t) = \int_s^t f(\tau) K_1(t, \tau) d\tau, \quad K_1(t, \tau) = G(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left[G^{-1}(\tau) + \omega(t, \tau) \right].$$

на границе роста $L(t)$ задается условие контакта трехмерного тела с двумерной поверхностью, которое при нулевом натяге приращиваемых элементов принимает вид [1, 2]

$$n_1 \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial t} + n_2 \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial t} = 0, \quad n_1 \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial t} + n_2 \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial t} = 0; \quad (4)$$

где n_1 и n_2 — компоненты единичного вектора нормали; $\Omega^*(t) = \Omega(t) \setminus \Omega_1$ — образовавшаяся в процессе аддитивного изменения часть тела (дополнительное тело); $E = E(t)$ и $G = G(t)$ — модули упругости при растяжении и сдвиге; $\omega(t, \tau)$ — мера ползучести при сдвиге; $K_1(t, \tau)$ — ядро ползучести; коэффициенты Пуассона упругой деформации и деформации ползучести совпадают и равны ν , \mathbf{I} — тождественный оператор. Значения всех функций в момент времени $\tau_0 \leq t \leq \tau_1$ известны из решения задачи для основного тела.

Отличительными особенностями начально-краевой задачи для аддитивно изготавливаемого тела (1)–(4), являются: нарушение условия совместности деформаций в области, занимаемой дополнительным телом, и выполнение лишь его аналога и аналога соотношений Коши в скоростях соответствующих величин; зависимость определяющих соотношений от функции $\tau_0 = \tau_0(x_1, x_2)$, которая может иметь разрывы первого рода.

Обозначив $\sigma_{ij}^0 = (\mathbf{I} - \mathbf{L}_{\tau_0}) \sigma_{ij} G^{-1}$, преобразуем задачу аддитивного изменения вязкоупругого тела с определяющими соотношениями (1)–(4) к задаче аддитивного изменения упругого тела, описываемого законом Гука

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \sigma_{11}^0}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}^0}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{12}^0}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{22}^0}{\partial x_2} = 0; \\
D_{11} = \frac{\partial v_1}{\partial x_1}; \quad D_{22} = \frac{\partial v_2}{\partial x_2}; \quad D_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_1}{\partial x_2} + \frac{\partial v_2}{\partial x_1} \right); \\
\sigma_{11}^0 = 2G \left(\frac{2K}{K+1} \varepsilon_{11} + \frac{K-1}{K+1} \varepsilon_{22} \right); \\
\sigma_{22}^0 = 2G \left(\frac{K-1}{K+1} \varepsilon_{11} + \frac{2K}{K+1} \varepsilon_{22} \right); \quad \sigma_{12}^0 = 2G \varepsilon_{12}; \\
(x_1, x_2) \in L(t): \quad n_1 \frac{\partial \sigma_{11}^0}{\partial t} + n_2 \frac{\partial \sigma_{12}^0}{\partial t} = 0; \quad n_1 \frac{\partial \sigma_{12}^0}{\partial t} + n_2 \frac{\partial \sigma_{22}^0}{\partial t} = 0.
\end{aligned} \tag{5}$$

Дифференцируя по времени уравнения равновесия и уравнения состояния из (5), краевую задачу для растущего тела приведем к виду

$$\begin{aligned}
\frac{\partial S_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial S_{12}}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{\partial S_{12}}{\partial x_1} + \frac{\partial S_{22}}{\partial x_2} = 0; \\
S_{11} = 2 \left(\frac{2K}{K+1} D_{11} + \frac{K-1}{K+1} D_{22} \right); \quad S_{22} = 2 \left(\frac{K-1}{K+1} D_{11} + \frac{2K}{K+1} D_{22} \right); \\
S_{12} = 2D_{12}, \quad S_{ij} = \partial \sigma_{ij}^0 / \partial t; \\
(x_1, x_2) \in L(t): \quad n_1 S_{11} + n_2 S_{12} = 0; \quad n_1 S_{12} + n_2 S_{22} = 0.
\end{aligned} \tag{6}$$

Краевая задача (6) совпадает по форме с краевой задачей теории упругости с параметром t . Ее решение может быть построено любым эффективным в теории упругости аналитическим или численным методом. Решение исходной начально-краевой задачи аддитивного изменения вязкоупругого стареющего тела при $t \in [\tau_1, \tau_2]$ можно восстановить затем по формулам обращения [1-2].

Основные соотношения задачи для тела, аддитивное изготовление которого прекращено, имеют вид (1)–(4), где отсутствует условие на границе роста.

Таким образом, краевые задачи для всех основных этапов эволюции тела приведены к краевым задачам, совпадающих по форме с краевыми задачами теории упругости с некоторым параметром. Для исследования последних применим методы теории функций комплексного переменного [3].

Основной вывод состоит в том, что если в задачах концентрации напряжений возле отверстий в готовом теле без учета процесса аддитивного изготовления максимум интенсивности касательных напряжений достигается на границе тела, то при аддитивном изготовлении максимум интенсивности касательных напряжений может достигаться в произвольной точке аддитивно изготовленной части тела.

Литература

- [1] Манжиров А.В., Михин М.Н. Методы теории функций комплексного переменного в механике растущих тел. *Вестник СамГУ. Естественная серия*, 2004, № 4 (34), с. 82–98.
- [2] Manzhirrov A.V., Mikhin M.N. 2D problems of surface growth theory with applications to additive manufacturing. *Journal of Physics: Conference Series: 5th International Conference on Topical Problems of Continuum Mechanics with a Special Session in Honor of Alexander Manzhirrov's 60th Birthday*. Tsakhkadzor, Institute of Physics Publishing, 2018, art. 012057.
- [3] Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. Москва, Науча, 1966, 647 с.

Overgrowth of Viscoelastic Aging Plate Weakened by Triangular Hole

M.N. Mikhin¹

Ovbelova@bmstu.ru

T.B. Belova¹

O.V. Belova²

¹ Branch of the Russian State University for the Humanities, Domodedovo, Russia

² BMSTU, Moscow, Russia

The problem of studying the stressed deformable state of a stretched viscoelastic aging plate having a triangular hole with rounded corners in the process of overgrowth according to the similarity law is considered. Arising classical and non-classical initial boundary-value problems of solid mechanics are considered. Methods for solving problems of growing solids mechanics are proposed. These methods are based on the i) reduction of non-classical problems of accretion of viscoelastic aging solids to the problems of elasticity with a parameter, ii) utilizing the theory of analytic functions for solving the latter problems, and iii) reconstruction of true characteristics of stress-strain state with the aid of obtained decoding formulas. The results of this work can be used for solving a lot of important applied problems of growing solids mechanics.

Keywords: growing solids, growth boundary, residual stress, viscoelasticity, aging material

References

- [1] Manzhirrov A.V., Mikhin M.N. Methods of the theory of functions of a complex variable in growing solids mechanics. *Vestnik of Samara State University. Natural Science Series*, 2004, no. 4 (34), pp. 82–98. (In Russ.)
- [2] Manzhirrov A.V., Mikhin M.N. 2D problems of surface growth theory with applications to additive manufacturing. *Journal of Physics: Conference Series: 5th International Conference on Topical Problems of Continuum Mechanics with a Special Session in Honor of Alexander Manzhirrov's 60th Birthday*. Tsakhkadzor, Institute of Physics Publishing, 2018, art. 012057.
- [3] Muskhelishvili N.I. Some Basic Problems of the Mathematical Theory of Elasticity. Moscow, Nauka Publ., 1977, 732 p. (In Russ.).

Применение теории зарастающих отверстий к теории зарастающих трещин

*М.Н. Михин*¹

*Т.Б. Белова*¹

*О.В. Белова*²

Ovbelova@bmstu.ru

¹ Филиал РГГУ, Домодедово Россия

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассматривается задача о зарастающей тонкой трещины, которая аппроксимируется тонким эллипсом. Исследуется зарастающее эллиптическое отверстие, у которого малая ось остается неизменной, а большая ось уменьшается по различным законам. Проанализированы основные этапы деформирования тела: до начала наращивания, в процессе и после остановки роста. Полученные результаты могут служить основой для решения важных прикладных задач для деталей и элементов конструкций, изготавливаемых при помощи технологий аддитивного производства.

Ключевые слова: растущее тело, граница роста, остаточное напряжение, вязкоупругость, стареющий материал

Литература

Манжиров А.В., Михин М.Н. Методы теории функций комплексного переменного в механике растущих тел. *Вестник СамГУ. Естественная серия*, 2004, № 4 (34), с. 82–98.

Application of the Theory for Overgrowing Holes to the Theory of Overgrowing Cracks

*M.N. Mikhin*¹

*T.B. Belova*¹

*O.V. Belova*²

Ovbelova@bmstu.ru

¹ Branch of the Russian, State University for the Humanities, Domodedovo, Russia

² BMSTU, Moscow, Russia

The problem of an overgrowing thin crack, which is approximated by a thin ellipse, is considered. An overgrowth elliptic hole is investigated, in which the small axis remains unchanged and the sick axis decreases according to different laws. The main stages of solid deformation are analyzed: before the beginning of growing, during the process and after the growing stage. The results obtained can serve as a basis for solving important applied problems for parts and structural elements manufactured using additive manufacturing technologies.

Keywords: growing solids, growth boundary, residual stress, viscoelasticity, aging material

References

Manzhairov A.V., Mikhin M.N. Methods of the theory of functions of a complex variable in growing solids mechanics. *Vestnik of Samara State University. Natural Science Series*, 2004, no. 4 (34), pp. 82–98.

Проникание в грунтово-скальные преграды ударников с конической и оживальной головной частью

А.В. Дюков

alexdyukov.job@yandex.ru

Т.А. Гущина

С.В. Федоров

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

На основе теории локального взаимодействия проведен сравнительный анализ силы сопротивления при проникании в грунтово-скальные преграды недеформируемых ударников с конической и оживальной головной частью. Нормальные напряжения на поверхности головной части ударника, контактирующей с преградой, принимались в виде квадратичной зависимости от нормальной к поверхности компоненты вектора скорости ударника, а касательные напряжения определялись на основании закона сухого трения. При проведении анализа использовались коэффициенты формы головной части, описывающие вклад в общую силу сопротивления слагаемых, зависящих от скорости ударника в нулевой, первой и второй степени.

Ключевые слова: проникание, грунтово-скальная преграда, недеформируемый ударник, коническая головная часть, оживальная головная часть, сила сопротивления

Для решения ряда важных задач, таких как, например, зондирование поверхностного слоя Земли, а в ближайшей перспективе и других космических тел Солнечной системы (планет, астероидов, комет) с целью изучения его строения, а также разведки полезных ископаемых, могут применяться высокоскоростные проникающие модули [1–3], способные за счет имеющегося у них запаса кинетической энергии проникать в грунтово-скальные преграды на значительное расстояние. При размещении в проникающем модуле заряда взрывчатого вещества может также решаться задача по разрушению и дроблению массивов горных пород [4]. Конструкция проникающего модуля должна быть ударопрочной с тем, чтобы исключить возможность его значительного деформирования в процессе проникания. В этих условиях процесс проникания модуля может рассматриваться, как движение абсолютно твердого недеформируемого тела в сопротивляющейся среде.

Для определения глубины проникания недеформируемых ударников и испытываемой ими при этом перегрузки необходима информация о силе сопротивления прониканию. Величина этой силы определяется значениями нормальных σ_n и касательных τ_n механических напряжений, действующих на

поверхности контакта головной части ударника с преградой (рис. 1). В рамках теории локального взаимодействия [5] нормальные напряжения часто представляются в виде квадратичной зависимости (называемой законом сопротивления) от проекции v_n вектора скорости ударника v на нормаль к поверхности его головной части в рассматриваемой точке, а касательные напряжения рассчитываются на основании закона сухого трения [6]

$$\sigma_n = Av_n^2 + Bv_n + C; \quad \tau_m = \mu\sigma_n, \quad (1)$$

где A, B, C — коэффициенты, зависящие от свойств материала преграды; μ — коэффициент трения.

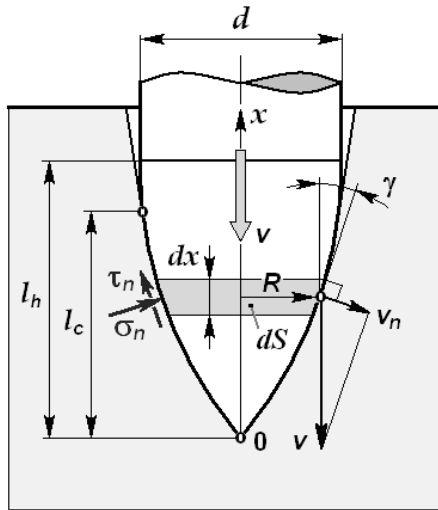


Рис. 1. Схема проникновения в грунтово-скальную преграду недеформируемого ударника

Интегрирование соотношений (1) по поверхности головной части ударника позволяет представить силу сопротивления преграды F_t в виде

$$F_t = \frac{\pi d^2}{4} \left[(k_{A1} + \mu k_{A2}) Av^2 + (k_{B1} + \mu k_{B2}) Bv + (k_{C1} + \mu k_{C2}) C \right], \quad (2)$$

где d — диаметр ударника; $k_{A1}, k_{A2}, k_{B1}, k_{B2}, k_{C1}, k_{C2}$ — коэффициенты, определяемые формой головной части ударника.

В реальной ситуации ударники обычно имеют головную часть конической или оживальной формы. Для этих форм головной части были выписаны аналитические выражения для коэффициентов формы $k_{A1}, k_{A2}, k_{B1}, k_{B2}, k_{C1}, k_{C2}$ в (2), устанавливающие их взаимосвязь с относительной высотой головной части l_h/d (l_h — высота головной части). При этом для головных частей оживальной формы было учтено, что их контакт с грунтово-скальной преградой

может происходить не по всей высоте l_h , а только по ее части l_c от носика до точки отрыва материала преграды от поверхности головной части. Относительная координата точки отрыва $\alpha_c = l_c / l_h$ определялась на основании решения задачи о расширении цилиндрического поршня в пластическом газе — среде, плотность которой возрастает при нагрузке (увеличении давления) и остается неизменной при последующей разгрузке (спаде давления) [7]. Модель пластического газа достаточно адекватно описывает поведение материала грунтово-скальных преград в связи с наличием в нем большого количества воздушных пор, захлопывающихся при сжатии материала. Закон расширения цилиндрического поршня соответствовал закону изменения радиуса головной части ударника в фиксированном сечении преграды при движении ударника. За радиус отрыва брался радиус поршня, при котором давление на его поверхности в процессе расширения становилось нулевым. В результате были получены значения относительной координаты α_c точки отрыва материала грунтово-скальной преграды от поверхности оживальной головной части в зависимости от ее относительной высоты l_h / d при различных параметрах сжимаемости материала преграды и значениях безразмерного комплекса, характеризующего соотношение прочностных свойств преграды со скоростным напором.

На основании проведенного сопоставления коэффициентов формы в (2) для ударников с конической и оживальной головной частью было установлено, что при $\alpha_c = 1$ (контакт по всей оживальной части) все коэффициенты, за исключением k_{B2} и k_{C1} , больше в случае оживальной формы (рис. 2). Уменьшение значения α_c для оживальной головной части слабо сказывается на уменьшении коэффициентов k_{A1} , k_{A2} , k_{B1} , приводя при этом к существенному снижению коэффициентов k_{B2} , k_{C1} , k_{C2} .

С привлечением эмпирических формул для глубины проникания недеформируемых ударников в грунтово-скальные преграды (Березанской формулы и формул Янга и Бернарда-Крейтона) [4, 8] было проведено сопоставление экспериментальных данных по влиянию формы головной части ударника на силу сопротивления преграды с полученными расчетными результатами. На основании того, что экспериментальные данные свидетельствуют о заметно более высоком сопротивлении прониканию головных частей оживальной формы в сравнении с конической, можно сделать вывод о значимости вклада в сопротивление преграды первого (инерционного) и третьего (прочностного) слагаемых в законе сопротивления (1), так как согласно рис. 2 именно коэффициенты формы k_{A1} и k_{C2} , соответствующие этим слагаемым, для оживальной головной части (при $\alpha_c = 1$) заметно выше, чем для конической. На основании Березанской формулы и формулы Янга было также установлено, что коэффициент трения μ в (1) на поверхности контакта головной части ударника с грунтово-скальной преградой должен лежать в диапазоне от 0,2 до 0,3.

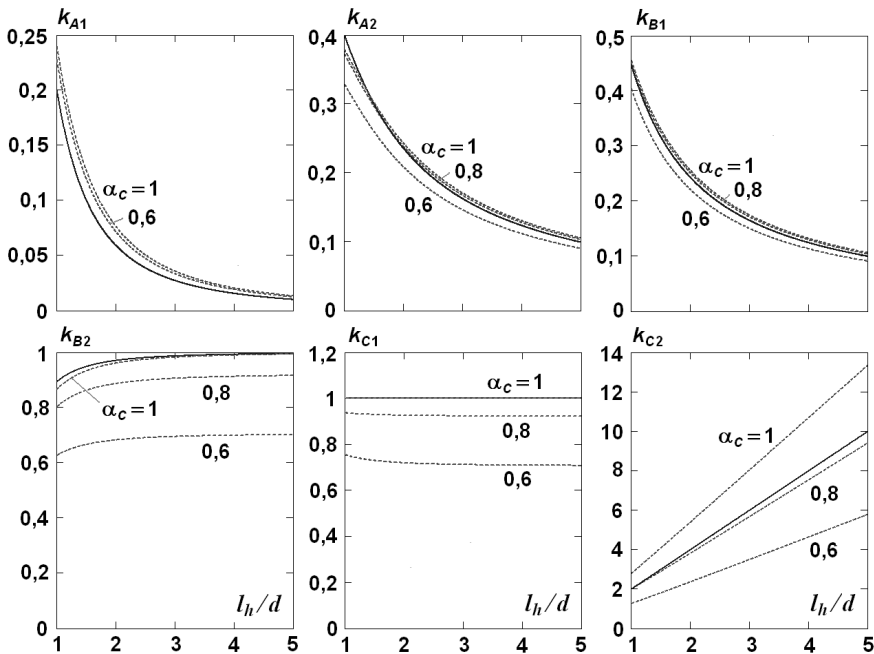


Рис. 2. Изменение коэффициентов формы для конической (сплошные линии) и оживальной (пунктирные линии) головной части в зависимости от ее относительной высоты

Результаты проведенного сравнительного анализа силы сопротивления при проникании в грунтово-скальные преграды ударников с различной формой головной части могут быть использованы при выборе конструктивных параметров проникающих модулей различного назначения и определении динамики их проникания.

Литература

- [1] Дубинский А.В. Обзор некоторых нетрадиционных приложений инженерной теории высокоскоростного проникания. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*, 2019, № 3, с. 125–139.
- [2] Федоров С.В., Велданов В.А. Применение сегментированных ударников для формирования каверны в грунтово-скальных преградах. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2012, № 1 (71), с. 43–50.
- [3] Федоров С.В., Федорова Н.А., Велданов В.А. Использование импульса реактивной тяги для увеличения глубины проникания исследовательских модулей в малопрочные грунтово-скальные преграды. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2014, № 4 (84), с. 53–63.
- [4] Балаганский И.А., Мержиевский Л.А. *Действие средств поражения и боеприпасов*. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2012, 408 с.
- [5] Bunimovich A.I., Dubinsky A. *Mathematical Models and Methods of Localized Interaction Theory*. Singapore, World Scientific, 1995, 300 p.

- [6] Велданов В.А., Федоров С.В. Особенности поведения грунта на границе контакта с недеформируемым ударником при проникании. *Прикладная механика и техническая физика*, 2005, т. 46, № 6, с. 116–127.
- [7] Сагомоян А.Я. *Проникание*. Москва, Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 1974, 300 с.
- [8] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Engineering models of high speed penetration into geological shields. *Central European Journal of Engineering*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 1–19.

Penetration into Soil-Rock Targets of Projectiles with Conical and Ogival Head Part

A.V. Dyukov

alexdyukov.job@yandex.ru

T.A. Gushchina

S.V. Fedorov

BMSTU, Moscow, Russia

On the basis of the local interaction theory, a comparative analysis of the resistance force during penetration into soil-rock targets of non-deformable projectiles with conical and ogival head part was carried out. Normal stresses on the projectile head surface in contact with the target were assumed as a quadratic dependence on the normal component of the projectile velocity vector to the surface, and tangential stresses were determined based on the law of dry friction. During the analysis, the coefficients of the head part shape were used, describing the contribution to the total resistance force of the terms depending on the projectile velocity in zero, first and second degrees.

Keywords: penetration, soil-rock target, non-deformable projectile, conical head part, ogival head part, resistance force

References

- [1] Dubinsky A.V. A review of some non-traditional applications of the engineering theory of high-speed penetration. *PNRPU Bulletin. Mechanics*, 2019, no. 3, pp. 125–139. (In Russ.).
- [2] Fedorov S.V., Veldanov V.A. Application of segmented projectiles for cavity formation in soil and rocky targets. *Bulletin of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences*, 2012, no. 1 (71), pp. 43–50 (in Russ.).
- [3] Fedorov S.V., Fedorova N.A., Veldanov V.A. Jet thrust impulse using for increase in research modules penetration depth into low-strength soil targets. *Bulletin of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences*, 2014, no. 4 (84), pp. 53–63 (in Russ.).
- [4] Balagansky I.A., Merzhievsky L.A. *Destructive Effects of Ammunition*. Novosibirsk, NSTU Press, 2012, 408 p. (in Russ.).
- [5] Bunimovich A.I., Dubinsky A. *Mathematical Models and Methods of Localized Interaction Theory*. Singapore, World Scientific, 1995, 300 p.
- [6] Veldanov V.A., Fedorov S.V. Soil behavior at the interface with a rigid projectile during penetration. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2005, vol. 46, № 6, pp. 867–875. (In Russ.).
- [7] Sagomonyan A.Ya. *Penetration*. Moscow, Moscow State Univ. Publ., 1974, 300 p. (in Russ.).
- [8] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Engineering models of high speed penetration into geological shields. *Central European Journal of Engineering*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 1–19.

Ускорение пластин при ударно-волновом нагружении

А.С. Старшикова

starshikovaas@student.bmstu.ru

С.В. Федоров

С.А. Люшнин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Для получения высокоскоростных металлических частиц при моделировании воздействия метеороидов и осколков космического мусора на защитные экраны космических аппаратов используется ударно-волновой разгон тонких металлических пластин при их соударении с ударным элементом, ускоренным легкогазовой баллистической установкой и имеющим на переднем торце вставку из слоев с уменьшающейся снаружу акустической жесткостью. Рассмотрен эффект увеличения скорости разгоняемой ударом пластины при размещении между ней и ударным элементом промежуточной системы пластин с монотонно уменьшающимся акустическим импедансом, значения которого заключены между импедансами ударного элемента и разгоняемой пластины.

Ключевые слова: легкогазовая баллистическая установка, ударный элемент, система пластин, пластинка-мишень, ударно-волновой разгон, акустический импеданс

С увеличением человеческой активности в околоземном космическом пространстве приобретает все большее значение проблема столкновений космических аппаратов с метеороидами и осколками космического мусора. Основную долю среди осколков космического мусора составляют частицы из алюминиевых сплавов (около 40 %). Для моделирования ударного воздействия метеороидов и осколков космического мусора на защитные конструкции космических аппаратов на этапе их отработки и испытаний в наземных условиях используются различные способы получения высокоскоростных компактных металлических элементов. Для решения этой проблемы могут быть применены легкогазовые баллистические установки [1, 2], электромагнитные ускорители различных схем, взрывные метательные устройства [3, 4].

Скорость столкновения осколков космического мусора с космическим аппаратом может составлять до 16 км/с (удвоенная первая космическая скорость). Достижение скоростей металлических частиц такого уровня в наземных условиях возможно с использованием легкогазовых баллистических установок в сочетании на заключительном этапе ускорения с дополнительным ударно-волновым разгоном, реализуемым при ударном нагружении системы тонких пластин с подобранной определенным образом акустической жесткостью (зависящей от плотности материала пластин и скорости звука в нем) [1, 2].

Легкогазовые баллистические установки позволяют разгонять компактные твердые тела массой в несколько десятков грамм до скоростей на уровне 7 км/с (двухступенчатые установки) и массой порядка 1 г до 10 км/с (трехступенчатые установки). Использование в качестве третьей ступени ускоре-

ния в двухступенчатой легкогазовой баллистической установке соударения цилиндрического ударника, разогнанного до скорости примерно 7 км/с и имеющего на переднем торце вставку из слоев материалов с уменьшающейся кнаружи акустической жесткостью, с тонкой пластиной (рис.1) позволяет ускорять последнюю до скоростей на уровне удвоенной первой космической скорости (≈ 16 км/с). В экспериментах [1] на переднем торце ударного элемента размещался набор слоев толщиной примерно от 0,3 до 1 мм из материалов с монотонно уменьшающимся акустическим импедансом $I = \rho_0 c_0$ (ρ_0 — плотность материала, c_0 — скорость звука в нем) в последовательности тантал, медь, титан, алюминий, магний, полиэтилен. В качестве мишени использовались титановые и алюминиевые пластинки диаметром от 6 до 10 мм, толщиной от 0,7 до 1 мм и массой от 0,07 до 0,34 г. В результате соударения пластинки-мишени в зависимости от их размеров и массы приобретали скорость от 11,5 до 15,8 км/с. При этом коэффициент увеличения скорости (по отношению к скорости ударного элемента) составлял от 1,64 до 2,34.

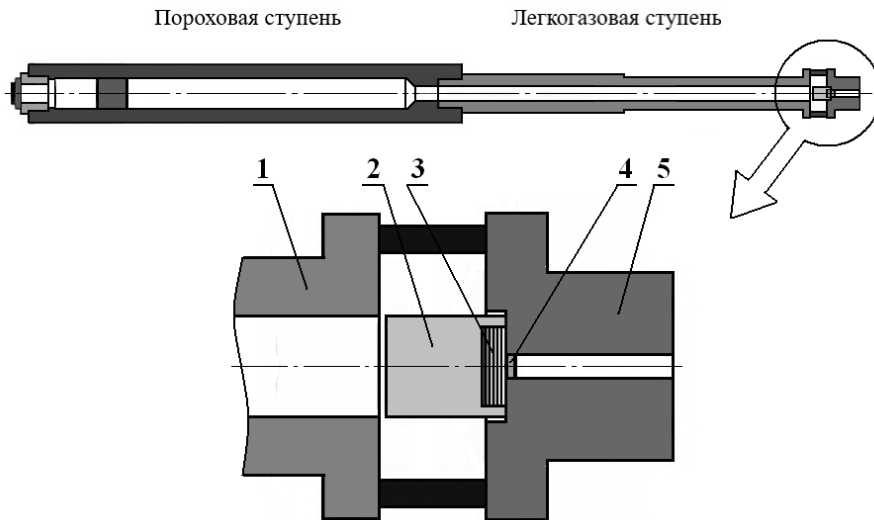


Рис. 1. Схема двухступенчатой легкогазовой баллистической установки с узлом ударно-волнового разгона тонкой пластинки:
 1 — ствол легкогазовой ступени; 2 — ударный элемент из лексана; 3 — вставка из слоев материалов с уменьшающимся кнаружи акустическим импедансом;
 4 — разгоняемая пластинка; 5 — вольфрамовый цилиндр

Особенности ударно-волновых процессов в системе пластин с монотонно уменьшающимся акустическим импедансом исследовались в рамках плоской одномерной задачи механики сплошных сред. Для описания поведения материалов пластин использовалась модель идеальной сжимаемой жид-

кости с баротропным уравнением состояния в форме Тэта [5]. Задача решалась численно конечно-разностным методом Уилкинса [5]. В качестве материала ударного элемента, скорость которого бралась равной $v_0 = 3$ км/с, рассматривался тантал ($\rho_0 = 16,4$ г/см³; $c_0 = 3,45$ км/с; $I = 56,6 \cdot 10^6$ кг/(м² · с)). Разгоняемая пластина, покоившаяся в начальный момент времени, была алюминиевой ($\rho_0 = 2,7$ г/см³; $c_0 = 5,3$ км/с; $I = 14,3 \cdot 10^6$ кг/(м² · с)). Анализировались случаи, когда танталовый элемент соударялся непосредственно с алюминиевой пластиной-мишенью, а также когда между ними размещались промежуточные пластины из меди ($\rho_0 = 8,9$ г/см³; $c_0 = 3,9$ км/с; $I = 34,7 \cdot 10^6$ кг/(м² · с)) и титана ($\rho_0 = 4,5$ г/см³; $c_0 = 4,7$ км/с; $I = 21,2 \cdot 10^6$ кг/(м² · с)), которые находились в контакте между собой и с алюминиевой пластиной и, как и она, покоились в начальный момент времени (рис. 2). Толщины всех пластин принимались равными 1 мм, а продольный размер танталового ударного элемента составлял 10 мм.

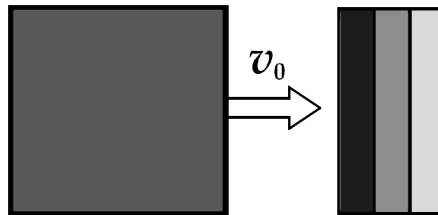


Рис. 2. Расчетная схема соударения ударного элемента с набором пластин

По результатам решения сформулированной задачи определялась конечная скорость алюминиевой пластины-мишени, приобретаемая ей в итоге двух волновых процессов — сначала за фронтом распространяющейся в пластине ударной волны, а после ее отражения от тыльной поверхности пластины в волне разгрузки, приводящей к удвоению скорости, сообщенной за фронтом ударной волны. Были получены следующие коэффициенты увеличения скорости (отношения скорости алюминиевой пластины-мишени к начальной скорости танталового ударного элемента): 1,48 — в отсутствие промежуточных пластин; 1,54 — при использовании одной промежуточной пластины из меди; 1,58 — при использовании двух промежуточных пластин из меди и титана. Как показал анализ волновых процессов, при распространении ударной волны по промежуточным пластинам с уменьшающимся акустическим импедансом распад разрыва на границах контакта пластин приводит к уменьшению давления за фронтом ударной волны при ее переходе из одной пластины в другую с одновременным увеличением массовой скорости материала за фронтом. Этим и объясняется эффект увеличения скорости алюминиевой пластины-мишени при ударе по ней через набор промежуточных пластин.

С использованием акустического приближения, позволяющего получить аналитическое решение рассматриваемой задачи, были установлены предельные возможности увеличения скорости v_m пластины-мишени с акустическим импедансом I_m , соответствующие случаю, когда удар по ней ударного элемента, имеющего больший акустический импеданс I_s и скорость v_0 , наносится через систему бесконечного числа бесконечно тонких пластин с непрерывно уменьшающимся от значения I_s до значения I_m акустическим импедансом. В отсутствие и при наличии такой системы пластин для скорости пластины-мишени получаются, соответственно, выражения

$$v_m = 2v_0 k_I / (k_I + 1); \quad v_m = v_0 \sqrt{k_I},$$

где $k_I = I_s / I_m$. Если в первом случае при неограниченном увеличении соотношения импедансов ($k_I \rightarrow \infty$) предельный коэффициент увеличения скорости ограничивается значением 2, то во втором случае он растет неограниченно.

Таким образом, введение между ударным элементом и разгоняемой пластиной промежуточной системы пластин с монотонно уменьшающимся акустическим импедансом от значения, соответствующего материалу ударного элемента, до значения, соответствующего материалу разгоняемой пластины, позволяет существенно повысить эффективность преобразования кинетической энергии ударного элемента в кинетическую энергию пластины. Наибольшая эффективность может быть достигнута при использовании промежуточного разгонного слоя с непрерывным по его толщине уменьшением акустического импеданса. Возможности практической реализации такого способа ударного разгона пластин находятся в прямой зависимости от прогресса в области развития технологий получения так называемых градиентных материалов [6] — материалов, функциональные свойства которых изменяются по их объему заданным систематическим образом.

Литература

- [1] Chhabildas L.C., Kmetyk L.N., Reinhart W.D., Hall C.A. Enhanced hypervelocity launcher — capabilities to 16 km/s. *International Journal of Impact Engineering*, 1995, vol. 17, pp. 183–194.
- [2] Thornhill T.F., Chhabildas L.C., Reinhart W.D., Davidson D.L. Particle launch to 19 km/s for micro-meteoroid simulation using enhanced three-stage light gas gun hypervelocity launcher techniques. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, vol. 33, pp. 799–811.
- [3] Selivanov V.V., Ladov S.V., Nikolskaya Ya.M., Fedorov S.V. Research of the explosive formation of a compact element for meteoroids fragments and space debris modeling. *Acta Astronautica*, 2019, vol. 163, pp. 84–90.
- [4] Бабури́н М.А., Баскаков В.Д., Зарубина О.В., Ладов С.В., Никольская Я.М., Федоров С.В. Применение профилированных по толщине заготовок для управления толщиной стенки штампемых свинцом оболочковых деталей. *Технология металлов*, 2016, № 11, с. 2–8.
- [5] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. *Прикладная механика сплошных сред: В 3 т. Т. 3. Численные методы в задачах физики быстротекающих процессов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 520 с.

- [6] Герасимов А.В., Шалковский Д.М. Ударно-волновое нагружение пластин, содержащих слои функционально градиентных материалов. *Механика композиционных материалов и конструкций*, 2002, т. 8, № 4, с. 533–542.

Plate Acceleration under Shock-Wave Loading

A.S. Starshikova starshikovaas@student.bmstu.ru

S.V. Fedorov

S.A. Lyushnin

BMSTU, Moscow, Russia

To obtain high-velocity metal particles, when modeling the impact of meteoroids and debris fragments on the protective screens of spacecraft, shock-wave acceleration of thin metal plates is used when they collide with an impact element accelerated by a light-gas ballistic installation and having an insert of layers with decreasing acoustic rigidity on the front end. The effect of increasing the velocity of the plate accelerated by impact is considered when placing between it and the impactor an intermediate system of plates with monotonically decreasing acoustic impedance, the values of which are enclosed between the impedances of the impactor and the accelerated plate.

Keywords: light-gas ballistic installation, impact element, plate system, target plate, shock-wave acceleration, acoustic impedance

References

- [1] Chhabildas L.C., Kmetyk L.N., Reinhart W.D., Hall C.A. Enhanced hypervelocity launcher — capabilities to 16 km/s. *International Journal of Impact Engineering*, 1995, vol. 17, pp. 183–194.
- [2] Thornhill T.F., Chhabildas L.C., Reinhart W.D., Davidson D.L. Particle launch to 19 km/s for micro-meteoroid simulation using enhanced three-stage light gas gun hypervelocity launcher techniques. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, vol. 33, pp. 799–811.
- [3] Selivanov V.V., Ladov S.V., Nikolskaya Ya.M., Fedorov S.V. Research of the explosive formation of a compact element for meteoroids fragments and space debris modeling. *Acta Astronautica*, 2019, vol. 163, pp. 84–90.
- [4] Baburin M.A., Baskakov V.D., Zarubina O.V., Ladov S.V., Nikol'skaya Ya.M., Fedorov S.V. Application of thickness-shaped workpieces to control the wall thickness of lead-formed shell parts. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2017, no. 13, pp. 1136–1140. (In Russ.).
- [5] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., Selivanov V.V. *Applied Continuum Mechanics: In 3 vols. Vol. 3. Numerical Methods in Problems of Physics of Fast-Flowing Processes*. Moscow, BMSTU Publ., 2006, 520 p. (in Russ.).
- [6] Gerasimov A.V., Shalkovsky D.M. Shock-wave loading of plates containing layers of functionally gradient materials. *Journal of Composite Mechanics and Design*, 2002, vol. 8, no. 4, pp. 533–542. (In Russ.).

Проектирование отечественной путеизмерительной тележки

А.Б. Вацлавский^{1,2}

a.vatslavskiy@mail.ru

¹ Московский политехнический университет, Москва, Россия

² ООО «Центр инновационного развития СТМ», Екатеринбург, Россия

В сложившейся ситуации железнодорожная отрасль столкнулась проблемой, что имеющаяся ручная импортная путеизмерительная техника начинает выходить из строя из-за отработки ресурса либо из-за различного рода поломок. На данный момент на рынке отечественной путеизмерительной техники отсутствуют какие-либо аналоги кроме ручных тахеометрических средств измерения, а их использование приведет к катастрофическому раздутию сроков измерения пути. Для решения данной проблемы было принято решение разработать отечественную путеизмерительную тележку. В качестве объекта исследования была взята универсальная геодезическая железнодорожная система GEDO Trimble. На основе имеющегося образца методом обратной разработки была спроектирована рама будущей отечественной путеизмерительной тележки. На данный момент перед нами стоит задача оптимизации существующей конструкции, которая заключается в изменении конструктивных особенностей рамы, выборе аналогов датчиков. Итогом работы станет комплекс, позволяющий в кратчайшие сроки и с высокой точностью проводить путеизмерительные работы. Помимо этого, комплекс будет являться полноценной заменой зарубежным аналогам.

Ключевые слова: путеизмерительная тележка, измерение пути, железная дорога

Литература

- [1] Приложение к свидетельству № 66304 об утверждении типа средств измерений. Описание типа средства измерений.
- [2] Приложение к свидетельству № 55476 об утверждении типа средств измерений. Описание типа средства измерений.

Designing a Domestic track Measuring Trolley

A.B. Vatslavskiy^{1,2}

a.vatslavskiy@mail.ru

¹ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

² "Innovation Development Center CTM" LLC, Yekaterinburg, Russia

In the current situation, the railway industry is faced with the problem that the existing manual imported track measuring equipment begins to fail due to exhaustion of the resource or due to various kinds of breakdowns. At the moment, there are no analogues on the market of domestic track measuring equipment other than manual total station theodolite, and their use will lead to a catastrophic bloat in terms of measuring the track. To solve this problem, it was decided to develop a domestic track measuring cart. The universal geodetic railway system GEDO Trimble was taken as the object of study. Based on the exist-

ing sample, the frame of the future domestic track measuring cart was designed by reverse engineering. At the moment, we are faced with the task of optimizing the existing design, which consists in changing the design features of the frame, choosing analogues of sensors. The result of the work will be a complex that allows to carry out track measuring work in the shortest possible time and with high accuracy. In addition, the complex will be a full-fledged replacement for foreign counterparts.

Keywords: track measurement systems, track measurement, railway

References

- [1] Appendix to certificate No. 66304 on type approval of measuring instruments. Description of the type of measuring instrument.
- [2] Appendix to certificate No. 55476 on type approval of measuring instruments. Description of the type of measuring instrument.

Уравнение огибающей линии предельных кругов напряжений хрупких материалов

Т.Б. Дуйшеналиев **DuyshenaliyevT@mpei.ru**

И.В. Меркурьев

И.Р. Исмагилов

НИУ МЭИ, Москва, 111250, Россия

Известно, что наибольшие круги напряжений, соответствующие моменту разрушения материала образуют закономерное семейство. Эти круги располагаются таким образом, что к ним можно провести огибающую линию. В работе получено уравнение этой линии. Оно позволяет провести количественную оценку напряженного состояния конструкционных и строительных материалов, а также горных пород.

Ключевые слова: хрупкие материалы, сжатие, предельные круги напряжений Мора, огибающая линия, уравнение огибающей линии

Любое напряженное состояние можно изобразить на плоскости нормального σ и касательного τ напряжений. По предположению Мора, разрушающие материал напряженные состояния, изображенные на плоскости σ , τ , должны образовать закономерное семейство. Закономерность выражается в том, предельные круги напряжений должны иметь общую огибающую линию. Считая положительными сжимающие напряжения, как принято в механике горных пород, обозначим через σ_1 , σ_3 соответственно наибольшее и наименьшее главные напряжения. Уравнение предельных кругов имеет вид

$$\sigma^2 + \tau^2 - (\sigma_1 + \sigma_3)\sigma + \sigma_1 \sigma_3 = 0. \quad (1)$$

В выражении (1) здесь и во всем дальнейшем, подразумеваются те значения напряжений, которые соответствуют моменту разрушения материалов.

Для того чтобы семейство кругов Мора (1) имело общую огибающую линию, оно должно определяться одним параметром. В качестве параметра выберем одно из главных напряжений, например, σ_1 . Для наличия огибающей линии предельных кругов напряжений необходимо, чтобы частная производная уравнения (1) по выбранному параметру была равна нулю:

$$-(1 + \sigma'_3)\sigma + (\sigma_3 + \sigma_1 \sigma'_3) = 0.$$

Отсюда находим:

$$\sigma = \frac{\sigma_3 + \sigma_1 \sigma'_3}{1 + \sigma'_3}. \quad (2)$$

Подставим (2) в уравнение (1):

$$\tau = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{1 + \sigma'_3} \sqrt{\sigma'_3}. \quad (3)$$

Выражения (2), (3) представляют собой уравнение огибающей предельных кругов Мора в параметрической форме.

Допустим, что из уравнений (2) и (3) удалось исключить параметр σ_1 , а также, определяемые этим параметром, функции $\sigma_3(\sigma_1)$, $\sigma'_3(\sigma_1)$. Это привело бы к явному уравнению огибающей линии

$$\tau = \tau(\sigma). \quad (4)$$

Подставим (4) в уравнение (1):

$$\sigma^2 + \tau(\sigma)^2 - (\sigma_1 + \sigma_3)\sigma + \sigma_1 \sigma_3 = 0. \quad (5)$$

Теперь на выражение (5) можно смотреть как на уравнение между главными напряжениями σ_1, σ_3 , которое содержит параметр σ . Задавая этому параметру разные значения, получим кривую на плоскости σ_1, σ_3 , т. е.

$$\sigma_3 = \sigma_3(\sigma_1). \quad (6)$$

Эта кривая второго порядка, ибо выражение (5) является алгебраическим уравнением второй степени относительно переменных σ_1, σ_3 . Кривая (6) имеет асимптоту, угловой коэффициент которой равен единице. Это следует из того, что огибающая линия предельных кругов в области больших давлений становится параллельной оси нормального напряжения (радиус кругов $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ стремится к постоянной величине). Из кривых второго порядка только гипербола имеет асимптоту. Это является основанием к поиску зависимости (6) в виде гиперболы, угловой коэффициент асимптоты которой равен единице.

Уравнение такой гиперболы выводится легко, оно имеет вид:

$$\sigma_3 = \frac{a+b}{2} + \sqrt{\frac{(a-b)^2}{8} + \sigma_1^2}, \tag{7}$$

где a, b — константы. Допустим, величины констант a, b для данного материала известны. В этом случае, задаваясь величинами σ_1 в пределах $0 \leq \sigma_1 < \infty$ и, вычисляя соответствующие им величины σ_3 , можно определить все предельные напряженные состояния. Можно построить и огибающую линию по следующим уравнениям:

$$\sigma = \frac{\sigma_3 + \sigma_1 \sigma_3'}{1 + \sigma_3'}, \quad \tau = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{1 + \sigma_3'} \sqrt{\sigma_3'}, \tag{8}$$

где $\sigma_3 = \frac{a+b}{2} + \sqrt{\frac{(a-b)^2}{8} + \sigma_1^2}$; $\sigma_3' = \frac{\sigma_1}{\sqrt{\frac{(a-b)^2}{8} + \sigma_1^2}}$.

Непосредственными результатами на трехосное сжатие материалов являются измеренные величины главных напряжений, при которых происходило разрушение. Ниже приведены результаты опытов Кармана (напряжения в кгс/см²) [1]:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= (1360 \ 2350 \ 3150 \ 3565 \ 4055 \ 5550) \\ \sigma_3 &= (\ 0 \ 200 \ 500 \ 685 \ 845 \ 1650) \end{aligned} \tag{9}$$

Подставляя опытные величины σ_1, σ_3 в уравнение (7), определим величины констант $a = 3043, b = -18\ 560$.

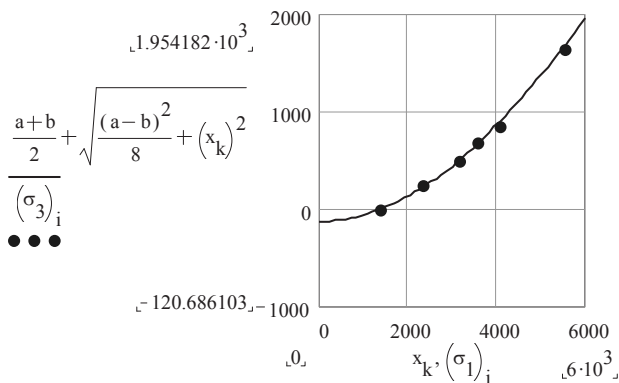


Рис. 1. График функции (7) (сплошная линия) и опытные данные (точки)

Величину предела прочности на осевое растяжение можно определить теоретически. Для этого в уравнении (7) надо положить $\sigma_1 = 0$ и определить величину этого предела. При этом получаем $\sigma_p = -120,378$.

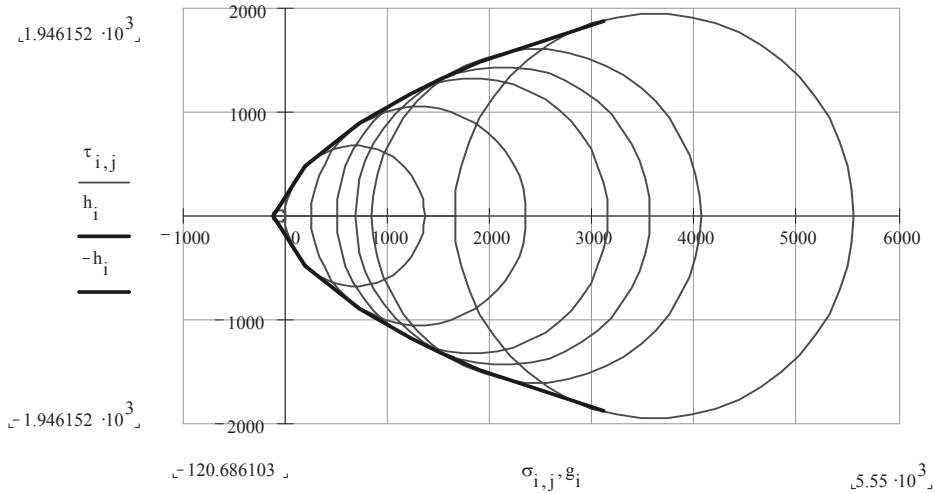


Рис. 2. Опытные круги напряжений и огибающая линия, построенная по уравнениям (8)

На рис.1 на график функции (7) нанесены опытные данные (9). Здесь график построен по значениям функции (7) при следующих величинах главного напряжения $\sigma_1 : 0, 120, 240, 360, \dots, 6000$.

На рис. 2 показаны круги напряжений по опытным данным (9), и огибающая линия, построенная по уравнениям (8).

Литература

- [1] Дуйшеналиев Т.Б. Количественное описание теории прочности Мора. *Известия Национальной академии наук КР*, 2012, № 4.

The Equation of the Envelope line of the Limiting Circles of Stresses of Brittle Materials

T.B. Duishenaliev **DuyshenaliyevT@mpei.ru**

I.V. Merkurjev

I.R. Ismagilov

MPEI National Research University, Moscow, Russia

It is known that the largest stress circles corresponding to the moment of material destruction form a regular family. These circles are arranged in such a way that an envelope line can be drawn to them. In the work, the equation of this line is obtained. It allows a quantitative assessment of the stress state of structural and building materials and also rocks.

Keywords: brittle materials, compression, Mohr limit stress circles, envelope line, envelope line equation

References

- [1] Duishenaliev T.B. Quantitative description of Mohr's theory of strength. *News of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic*, 2012, no. 4, pp. 47–50. (In Russ.).

Численное исследование влияния комплексных нагрузок от мостового пролета на работу опорной части

А.П. Панькова **anastasia_pankova@mail.ru**

А.А. Каменских

ПНИПУ, Пермь, Россия

Настоящая работа направлена на исследование деформационного поведения сферических опорных частей мостов в рамках учета комплексного воздействия нагрузок на конструкцию (вертикальные и горизонтальные). Рассматривается опорная часть, рассчитанная на номинальную нагрузку 1000 кН. Толщина сферической антифрикционной прослойки может варьироваться. Исследовано влияние толщины (4, 6 мм) слоя скольжения на работу конструкции при комплексной нагрузке от мостового пролета.

Ключевые слова: модифицированный фторопласт, опорная часть, контактная задача, слой скольжения, узел трения

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 22-29-01313.

Литература

- [1] Adamov A.A., Kamenskih A.A., Pankova A.P. Influence Analysis of the Antifriction Layer Materials and Thickness on the Contact Interaction of Spherical Bearings Elements. *Lubricants*, 2022, vol. 10, iss. 2, art. 30, pp. 1–13.

Numerical Study of the Complex Loads Influence from the Bridge Span on the Bearing Operation

A.P. Pankova anstasia_pankova@mail.ru

A.A. Kamenskih¹

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

The research work considered the deformation behavior of the spherical bearing part of bridge constructs under the presser of complex loads (vertical and horizontal). The paper considers bearing part perceives nominal load 1000 kN. The spherical antifriction layer thickness can vary. Influence slip layer thickness (4, 6 mm) is considered for the work of construction under bridge complex loads.

Keywords: modified PTFE, bearing part, contact mechanics, friction unit

The work was supported by the RSF, project No. 22-29-01313.

References

- [1] Adamov A.A., Kamenskih A.A., Pankova A.P. Influence Analysis of the Antifriction Layer Materials and Thickness on the Contact Interaction of Spherical Bearings Elements. *Lubricants*, 2022, vol. 10, iss. 2, art. 30, pp. 1–13.

Исследование процесса получения отверстий в полимерных композиционных материалах сверлами с подрезающими кромками с вакуумными ионно-плазменными износостойкими покрытиями

В.И. Богданович bogdanovich@ssau.ru

Ю.А. Вашуков vashukov@ssau.ru

М.Г. Гиорбелидзе m.giorbelidze@ssau.ru

С.В. Коваленко

Самарский университет, Самара, Россия

Рассмотрены вопросы обработки отверстий в композиционных материалах сверлами с подрезающими кромками. Предложен метод повышения режущих свойств инструмента за счет нанесения вакуумного ионно-плазменного износостойкого покрытия. Проведены экспериментальные исследования по отработке режимов нанесения вакуумного ионно-плазменного износостойкого покрытия на образцы из быстрорежущей стали. Экспериментально исследованы процессы износа режущего инструмента при сверлении полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: отверстие, сверление, полимерные композиционные материалы, инструментальный материал, подрезающие кромки, вакуумное ионно-плазменное напыление, износостойкое покрытие, экспериментальные исследования

Введение. Широкое использование в аэрокосмической отрасли полимерных композиционных материалов (ПКМ) позволяет значительно повысить эксплуатационные характеристики изделий, а также снизить трудоемкость и материалоемкость их изготовления [1]. При этом одним из важных направлений, от которого зависит эффективность использования ПКМ в аэрокосмической технике является формирования мест механических точечных (болтовых и заклепочных) соединений в конструкциях из ПКМ. Так, большинство разрушений конструкций из ПКМ происходит в зоне соединений (60...85%). Это связано с тем, что соединяемые места являются главным источником концентрации напряжений. Кроме того, вес стыков часто составляет 20...30% от веса конструкции [1–3].

Наибольшее применение в качестве технологической операции образования отверстий под механические точечные соединения в конструкциях из ПКМ получило сверление. Вместе с тем, операция сверления в конструкциях из ПКМ является одним из сложных процессов резания, так как при ее осуществлении на режущей кромке сверла нагрузка и скорость меняются от минимума у оси сверла до максимума на периферии режущей кромки, при этом процесс осуществляется в стесненных условиях отверстия. Один из путей совершенствования инструмента — возможность выравнивания нагрузок по длине режущей кромки. К таким представителям относятся сверла с подрезающими режущими кромками (ПРК). Конструкция этих сверл позволяет перераспределить в процессе резания толщину припуска между подрезающими и центральными режущими кромками [4]. Формообразование сверл такой конструкции повышает трудоемкость заточки инструмента (рис. 1), однако при этом существенно повышается стойкость сверл и одновременно улучшается качество обработки. Вместе с тем, высокая абразивная способность армирующих волокон и наполнителя, низкая теплопроводность ПКМ приводит к тому, что в процессе их резания основная часть выделенного тепла уходит в инструмент. Тепловой фактор влияет на стойкость инструмента, вызывает появление прижогов на обработанной поверхности, изменяет структуру поверхностного слоя материала детали. При большом износе инструмента снижаются точность и качество обработки. Это особенно сильно проявляется в процессе сверления на входе и выходе сверла.

Для обработки угле-и стеклопластиков наиболее оптимальными марками инструментального материала являются быстрорежущая сталь марок Р6М5 и Р6М5К5 и твердые сплавы ВК6, ВК8 [4]. По своим физико-механическим свойствам твердые и сверхтвердые вольфрамокобальтовые сплавы являются наиболее предпочтительными для сверления композитов. Они мало меняют свои характеристики при нагревании в диапазоне температур до 500...600 °С. Вместе с тем они относительно хрупкие, обладают относительно низкой твердостью и теплостойкостью. Это ведет к стремительному износу инструмента по задней поверхности. Кроме того, в твердосплавных сверлах вольфрамокобальтовой группы в процессе сверления может произойти хрупкое разруше-

ние, исключая дальнейшую их переточку. Такая закономерность объясняется тем, что эти сверла в меньшей степени, чем быстрорежущие, отводят тепло, а также не выдерживают биения, возникающего при зажиме в цанге.

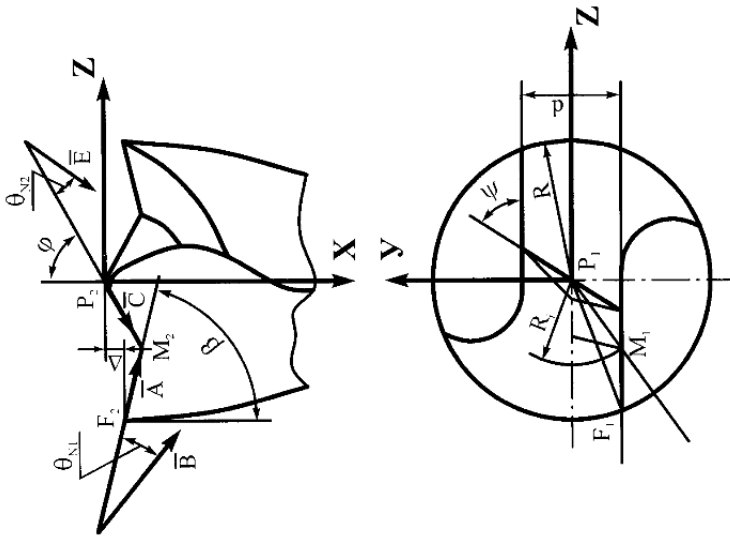


Рис. 1. Геометрия сверла с подрезающими режущими кромками

Применение традиционных методов повышения режущих свойств инструментов за счет сложного легирования инструментальных материалов в большей степени ограничено из-за высокой стоимости ряда элементов. В связи с этим широкое распространение получают методы повышения работоспособности инструментов за счет нанесения покрытий, где наибольшая доля принадлежит методу вакуумного ионно-плазменного напыления [5]. Потенциальные возможности покрытий в повышении стойкости обрабатываемого инструмента значительны и определяются материалом покрытия, его структурой, обоснованным назначением и регламентацией условий их применения [5–8]. Однако насколько достижимы эти потенциальные свойства покрытия определяется технологическим методом их получения и наличием дефектности его структуры в виде микрокапельных включений, столбчатых кристаллов с недостаточной когезионной прочностью между собой и т. д. [5–8].

Рассмотрение имеющихся в литературе данных свидетельствует о возможности управления свойствами режущего инструмента с износостойкими покрытиями с целью повышения его эффективности путем изменения состава и структуры покрытия, что отличает метод вакуумного ионно-плазменного напыления от известных способов химического осаждения покрытий [5].

Среди износостойких покрытий наиболее широкое распространение в России и за рубежом получили покрытия из нитрида титана, особенно для упрочнения обрабатывающего инструмента. При этом максимальная эффективность износостойких покрытий достигается при толщинах, близких к величине критического износа.

Целью работы является экспериментальное исследование процессов износа сверл с подрезающими кромками, упрочненных износостойким покрытием, при сверлении изделий из полимерных композиционных материалов.

Экспериментальные исследования. Для отработки режимов напыления предварительно изготавливались образцы-свидетели в виде цилиндрических образцов диаметром 15 мм и высотой 5 мм из стали Р6М5, термообработанной на твердость HRC 64÷65. Для каждого вида покрытия было проведено 5 экспериментальных садок. Время напыления для всех экспериментов составляло 30 мин. Износостойкие покрытия получали с использованием серийной установки вакуумного ионно-плазменного напыления ННВ–6.6–И1. На готовых образцах измеряли твердость и модуль упругости. Для покрытий эти характеристики определяли при наноиндентировании с помощью нанотвердомера Agilent Technologies G200 Nano Indenter (США) по методу Оливера-Фарра с использованием пирамиды Берковича. Нагрузку на индентор изменяли в интервале от 0,5 до 30 мН; глубина проникновения индентора составляла 30...350 нм. Обработку экспериментальных данных осуществляли по результатам измерений не менее 3 отпечатков, полученных при одинаковых условиях эксперимента.

Толщину покрытий определяли с помощью толщиномера шарового истирания «Константа-Ш1». Измерение основано на определении геометрических размеров сферы («сферического шлифа»), образованной при абразивном истирании покрытия и, частично, образца стальным вращающимся шариком при добавлении в зону контакта алмазной абразивной суспензии (рис. 2). Также с помощью толщиномера проводилась качественная сравнительная оценка износостойкости покрытия по времени истирания напыленного слоя до основы. Истирание проводилось шаром диаметра 60 мм с частотой вращения 60 об/мин при подаче абразива 0,1 мкм.

На основании результатов экспериментов были отобраны оптимальные режимы нанесения для каждого покрытия, которые были использованы для напыления режущего инструмента.

В процессе испытаний сверлились сквозные отверстия на заготовках из
– стеклопластика основа — ткань Т1014, связующее — 5-211-БН, схема укладки — 0...90°;

– углепластика марки КМУ 11тр на основе связующего ЭДТ-69н и наполнителя УТ-900 с ортотропной схемой армирования.

Толщина заготовок составляла 5 мм. Сверление проводилось на станке с ЧПУ-Compact 330 станок соответствовал установленным нормам точности и жесткости. Для проведения испытаний использовались сверла $\varnothing 5$ мм, име-

ющими угол при вершине $2\beta = 130^\circ$ и выполненные из быстрорежущей стали Р6М5. Сверление осуществлялось при подаче $S = 0,11$ мм/об и скорости резания $V = 36$ м/мин. В таблице 1 представлены экспериментальные данные по количеству просверленных отверстий одним сверлом до переточки при условии сохранения точности и допустимой шероховатости поверхности.

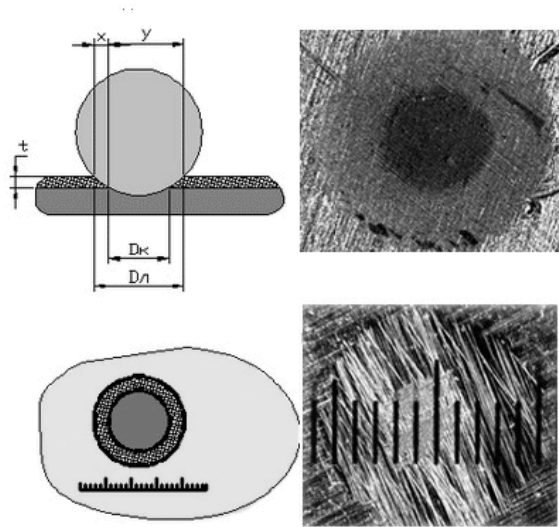


Рис. 2. Вид поверхности сферического шлифа

Исследование процесса износа сверлами с подрезающими кромками

Инструментальный материал	Обрабатываемый материал			
	Стеклопластик		Углепластик	
	$h_{\text{изн}}$	$K_{\text{шт}}$	$h_{\text{изн}}$	$K_{\text{шт}}$
Р6М5 без износостойкого покрытия	0,45–0,50	400	0,40–0,42	300
Р6М5 с износостойким покрытием	0,10–0,12	800	0,12–0,14	800

Заключение. Отобраны оптимальные режимы нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия, которые были использованы для напыления режущего инструмента, выполненного из быстрорежущей стали. Предложенный способ повышения режущих свойств инструмента за счет нанесения вакуумного ионно-плазменного износостойкого покрытия, что позволяет снизить величину износа по задней поверхности сверл, выполненных из быстрорежущей стали.

Литература

- [1] Сироткин О.С., Гришин В.И., Литвинов В.Б. Проектирование, расчет и технология соединений авиационной техники. Москва, Машиностроение, 2006, 331 с.
- [2] Vashukov Yu.A., Klimov E.A. Determination of permissible stresses along the stiffened hole outline in designs of anisotropic composite materials. *Materials Science Forum*, 2018, vol. 945 MSF, pp. 344–349.
- [3] Vashukov Yu.A. Modeling and optimization of a mechanical point connection with reinforcement of structures containing polymer composite materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 753, iss. 5.
- [4] Лупкин Б.В., Мамлюк О.В., Кошкина О.М. Исследование качества поверхности композиционных материалов при обработке сверлами с подрезающими кромками. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*, 2011, № 51, с. 98–104.
- [5] Барвинок В.А., Богданович В.И. Физические основы и математическое моделирование процессов вакуумного ионно-плазменного напыления. Москва, Машиностроение, 1999, 309 с.
- [6] Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Main problems of mathematical modeling high energies plasma technologies. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 795, iss. 1, art. 012004.
- [7] Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Ion-plasma coatings performance properties improvement obtained by arc deposition. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1118, art. 012005.
- [8] Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Ion-plasma treated parts quality improvement analysis based on the reliability theory criteria. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1118, art.r 012004.

Investigation of Obtaining Holes Process in Polymer Composite Materials by Drills with Cutting Edges with Vacuum Ion-Plasma Wear-Resistant Coatings

V.I. Bogdanovich bogdanovich@ssau.ru
Yu.A. Vashukov vashukov@ssau.ru
M.G. Giorbelidze m.giorbelidze@ssau.ru
S.V. Kovalenko

Samara University, Samara, Russia

The issues of processing holes in composite materials with drills with cutting edges are considered. A method of increasing the cutting properties of the tool by applying a vacuum ion-plasma wear-resistant coating is proposed. Experimental studies have been carried out to test the modes of applying a vacuum ion-plasma wear-resistant coating to samples from high-speed steel. The processes of cutting tool wear during drilling of polymer composite materials have been experimentally investigated.

Keywords: hole, drilling, polymer composite materials, tool material, cutting edges, vacuum ion-plasma deposition, wear-resistant coating, experimental studies

References

- [1] Sirotkin O.S., Grishin V.I., Litvinov V.B. *Design, calculation and technology of aviation equipment connections*. Moscow, Mashinostroenie, 2006, 331 p. (In Russ.).
- [2] Vashukov Yu.A., Klimov E.A. Determination of permissible stresses along the stiffened hole outline in designs of anisotropic composite materials. *Materials Science Forum*, 2018, vol. 945 MSF, pp. 344–349.
- [3] Vashukov Yu.A. Modeling and optimization of a mechanical point connection with reinforcement of structures containing polymer composite materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 753, iss. 5.
- [4] Лупкин Б.В., Мамлюк О.В., Кошкина О.М. Исследование качества поверхности композиционных материалов при обработке сверлами с подрезающими кромками. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*, 2011, № 51, с. 98–104.
- [5] Барвинок В.А., Богданович В.И. Физические основы и математическое моделирование процессов вакуумного ионно-плазменного напыления. Москва, Машиностроение, 1999, 309 с.
- [6] Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Main problems of mathematical modeling high energies plasma technologies. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 795, iss. 1, art. 012004.
- [7] Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Ion-plasma coatings performance properties improvement obtained by arc deposition. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1118, art. 012005.
- [8] Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Ion-plasma treated parts quality improvement analysis based on the reliability theory criteria. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1118, art.r 012004.

Воздействие сейсмозрывных волн в кусочно-однородном цилиндрическом теле

И.И. Сафаров¹

М.Х. Тешаев²

Б.С. Рахмонов³ *bah-bahodir@yandex.ru*

¹Tashkent Institute of Chemical Technology, Tashkent, Uzbekistan

²Bukhara engineering-technological institute, Bukhara, Uzbekistan

³Urgench state university, Urgench, Uzbekistan

Рассматривается воздействие сейсмозрывных волн в кусочно-однородном цилиндрическом теле. Разработана методика решения и алгоритм исследования воздействия волн в протяженных телах с жидкостью.

Ключевые слова: оболочка, волна, дифракция, источник

Литература

Safarov I.I., Kulmuratov N.R., Teshayev M.K., Kuldashov N.U. Interaction of Nonstationary Waves on Cylindrical Body//Scientific Journal Applied Mathematics, 2019, 10, 435-447.

The Impact of Seismic and Explosive Waves in a Piecewise Homogeneous Cylindrical Body

*I.I. Safarov*¹

*M.Kh. Teshayev*²

*B.S. Rakhmonov*³ bah-bahodir@yandex.ru

¹Tashkent Institute of Chemical Technology, Tashkent, Uzbekistan

²Bukhara engineering-technological institute, Bukhara, Uzbekistan

³Urgench state university, Urgench, Uzbekistan

The effect of seismic-explosive waves in a piecewise homogeneous cylindrical body is considered. A method for solving and an algorithm for studying the effects of waves in extended bodies with a liquid has been developed.

Keywords: shell, wave, diffraction, source

The effect of seismic-explosive waves in a piecewise homogeneous cylindrical body with a liquid located in a deformable medium is considered. The high-frequency nature of the changes in contour stresses affecting the inner free surface is detected.

Reference

Safarov I.I., Kulmuratov N.R., Teshayev M.K., Kuldashov N.U. Interaction of Nonstationary Waves on Cylindrical Body//Scientific Journal Applied Mathematics, 2019, 10, 435-447.

Кинематический анализ планетарной передачи с овальными зубчатыми колесами

М.Н. Мовсисян 123mger@mail.ru

А.А. Приходько

КубГТУ, Краснодар, Россия

Исследован механизм с возвратно-вращательным движением выходного звена, представляющий собой двухрядную планетарную передачу с внешним зацеплением. Каждая из двух зубчатых пар передачи состоит из овальных зубчатых колес с осями вращения в центре симметрии. Проведен кинематический анализ различных вариантов предложенной планетарной передачи, отличающихся эксцентриситетами овала каждой пары колес. В результате исследований кинематики построена функция угла поворота и определены углы качания выходного вала передачи при различных эксцентриситетах каждой пары овальных зубчатых колес.

Ключевые слова: овальное зубчатое колесо, планетарный механизм, кинематический анализ

Машины и механизмы с некруглыми зубчатыми колесами находят все более широкое распространение и применение вследствие совершенствования оборудования и технологий машиностроительных производств, а также снижения стоимости изготовления [1, 2]. Значительными преимуществами данного типа передач по сравнению с традиционными рычажными механизмами [3] являются более высокая компактность, уравновешенность, возможность получения различных видов движения (неравномерное движение [4], прерывистое движение [5, 6], возвратно-вращательное [7] и возвратно-поступательное движение [8]) и передаточных функций [9, 10].

Целью работы является кинематический анализ механизма с возвратно-вращательным движением выходного звена, представляющего собой двухрядную планетарную передачу с внешним зацеплением (рис. 1).

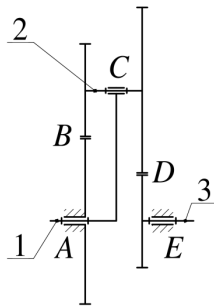


Рис. 1. Структурная схема планетарного механизма

Структура механизма включает в себя два двухвершинных звена 1 и 3, одно трехвершинное звено 2, неподвижные кинематические пары A , C , E и двухподвижные кинематические пары B и D .

Кинематический анализ механизма проводится с помощью построения плана скоростей его звеньев (рис. 2).

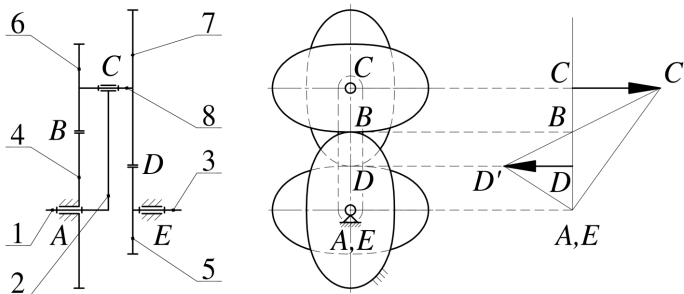


Рис. 2. План скоростей звеньев планетарного механизма:

- 1 — входной вал, 2 — водило, 3 — выходной вал, 4 — солнечное зубчатое колесо,
- 5 — зубчатое колесо на выходном валу, 6, 7 — зубчатые колеса сателлита,
- 8 — вал сателлита

Как видно из рисунка, механизм содержит две пары овальных зубчатых колес 4, 6 и 5, 7. Аналог угловой скорости выходного звена 3 определится по формуле

$$\varphi_3 = \frac{d\varphi_3}{d\varphi_1} = \frac{\omega_3}{\omega_1} = \frac{V_D \cdot AC}{V_C \cdot DE} = \frac{BD \cdot AC}{BC \cdot DE}, \quad (1)$$

где φ_1 , φ_3 и ω_1 , ω_3 — углы поворота и угловые скорости входного 1 и выходного вала 3, соответственно; V_D , V_C — скорости точек D и C .

Как видно из рис. 2, точки B и D меняют свое положение относительно неподвижной точки A , это приводит к изменению величины и направления вектора скорости DD' . Для определения отрезков в уравнении (1) воспользуемся уравнением эллипса в полярных координатах [11] и получим:

$$BD = \rho_6 - \rho_7; \quad (2)$$

$$BC = \rho_6; \quad (3)$$

$$AC = h; \quad (4)$$

$$DE = h - \rho_7, \quad (5)$$

где h — межосевое расстояние; $\rho_6 = \frac{p_1}{1 - e_1 \cos 2\varphi_6}$ — радиус центроиды

овального колеса 6, $\rho_7 = \frac{p_2}{1 - e_2 \cos 2\varphi_7}$ — радиус центроиды овального коле-

са 7, $\varphi_7 = \varphi_6 + \pi/2$ — угол поворота овального колеса 7; e_1, p_1 — эксцентриситет и фокальный параметр первой пары овальных колес (4, 6), e_2, p_2 — эксцентриситет и фокальный параметр второй пары овальных колес (5, 7).

Взаимосвязь между углами φ_6 и φ_1 определяется из передаточного отношения первой пары овальных зубчатых колес 4, 6.

Подставляя уравнения (2)–(5) в (1), получим формулу для нахождения аналога скорости выходного вала планетарного механизма:

$$\varphi_3 = \frac{(\rho_6 - \rho_7)h}{\rho_6(h - \rho_7)}. \quad (6)$$

Дифференцируя (6) по обобщенной координате, получим функцию угла поворота выходного вала. Графики функций угла поворота выходного вала $\varphi_3(\varphi_1)$ и угла качания выходного вала $\alpha(e_1, e_2)$ при различных эксцентриситетах овальных зубчатых колес показаны на рис. 3, 4.

Анализ графиков на рис. 3, 4 показывает, что выходной вал планетарного механизма совершает возвратно-вращательное движение, при этом увеличение эксцентриситета любой пары овальных зубчатых колес увеличивает угол качания выходного вала.

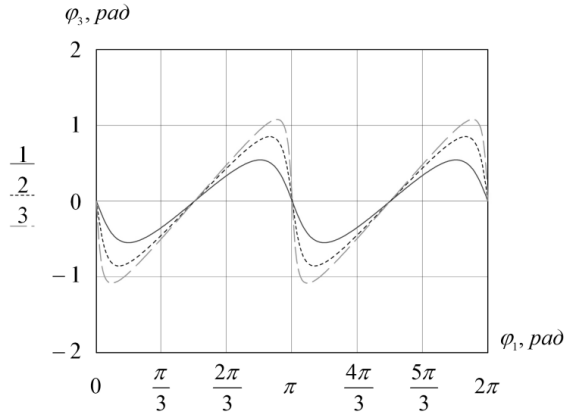


Рис. 3. Графики функций угла поворота выходного вала при различных эксцентриситетах:
1 — $e_1 = 0.28, e_2 = 0.28$; 2 — $e_1 = 0.28, e_2 = 0.6$; 3 — $e_1 = 0.6, e_2 = 0.6$

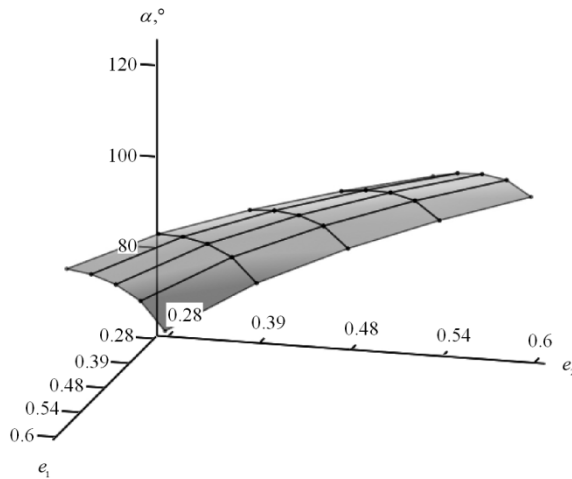


Рис. 4. Графики функций угла качания выходного вала при различных эксцентриситетах e_1 и e_2

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента РФ (СП-4790.2022.1) и с использованием оборудования ЦКП «Исследовательский центр пищевых и химических технологий» КубГТУ (СКР_3111), развитие которого было поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2021-679).

Литература

- [1] Chang S.L., Tsay C.B., Wu L.I. Mathematical model and undercutting analysis of elliptical gears generated by rack cutters. *Mechanism and Machine Theory*, 1996, vol. 31, no. 7, pp. 879–890.

- [2] Bair B.W. Computerized tooth profile generation of elliptical gears manufactured by shaper cutters. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 122, no. 2–3, pp. 139–147.
- [3] Смелягин А.И., Приходько А.А. Кинематический анализ сложного исполнительного механизма возвратно-вращательного перемешивающего устройства. *Наука. Техника. Технологии (Политехнический вестник)*, 2014, № 4, с. 79–86.
- [4] Павлов А.Е., Павлова Л.А. Сопряжение двух центроид, одна из которых — эксцентричная окружность. *Агроинженерия*, 2017, № 5 (81), с. 13–17.
- [5] Пожбелко В.И., Шагиахметов А.И., Ахметшин Н.И. Новый способ регулирования угла выстоя и классификация регулируемых зубчато-рычажных механизмов периодического поворота. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Машиностроение*, 2005, № 1 (41), с. 181–184.
- [6] Zheng F., Hua L., Han X., Li B., Chen D. Synthesis of indexing mechanisms with non-circular gears. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, vol. 105, pp. 108–128.
- [7] Брискин Е.С., Приходько А.А., Смелягин А.И. О математическом моделировании динамики планетарного возвратно-вращательного перемешивающего устройства. *Известия Волгоградского государственного технического университета*, 2017, № 14 (209), с. 11–18.
- [8] Приходько А.А., Новицкий А.В. Структурный и кинематический анализ исполнительного механизма возвратно-поступательного движения. *VIII Международная конференция «Проблемы механики современных машин»: сб. ст.* УланУдэ: Изд-во ВСГТУ, 2022, с. 542–547.
- [9] Ottaviano E., Mundo D., Danieli G.A., Ceccarelli M. Numerical and experimental analysis of non-circular gears and cam-follower systems as function generators. *Mechanism and machine theory*, 2008, vol. 43, no. 8, pp. 996–1008.
- [10] Litvin F.L., Gonzalez-Perez I., Fuentes A., Hayasaka K. Design and investigation of gear drives with non-circular gears applied for speed variation and generation of functions. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 2008, vol. 197, no. 45–48, pp. 3783–3802.
- [11] Litvin F.L., Fuentes A. *Gear geometry and applied theory*. Cambridge, Cambridge University Press, 2004, 800 с.

Kinematic Analysis of a Planetary Mechanism with Oval Gears

M.N. Movsisyan

123mger@mail.ru

A.A. Prikhodko

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

The paper investigates a mechanism with a reciprocating rotational movement of the output link, which is a two-row planetary gear with external gearing. Each of the two gear pairs of the transmission consists of oval gears with axes of rotation in the center of symmetry. A kinematic analysis of various variants of the proposed planetary gear, which differ in the eccentricities of the oval of each pair of wheels, has been carried out. As a result of kinematics studies, the function of the angle of rotation was constructed and the swing angles of the transmission output shaft were determined for different eccentricities of each pair of oval gears.

Keywords: oval gear, planetary gear, kinematic analysis

References

- [1] Chang S.L., Tsay C.B., Wu L.I. Mathematical model and undercutting analysis of elliptical gears generated by rack cutters. *Mechanism and Machine Theory*, 1996, vol. 31, no. 7, pp. 879–890.

- [2] Bair B.W. Computerized tooth profile generation of elliptical gears manufactured by shaper cutters. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 122, no. 2–3, pp. 139–147.
- [3] Smelyagin A.I., Prikhodko A.A. Kinematic analysis of a complex actuating mechanism of a reciprocating-rotary mixing device. *Nauka. Tehnika. Tehnologii (Politehnicheskij vestnik) — Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin)*, 2014, no. 4, pp. 79–86. (In Russ.).
- [4] Pavlov A.E., Pavlova L.A. Conjugation of two centroids, one of which is an eccentric circle. *Agroinzhenerija — Agroengineering*, 2017, iss. 5 (81), pp. 13–17. (In Russ.).
- [5] Pozhbelko V.I., Shagiakhmetov A.I., Akhmetshin N.I. A new way to control the dwell angle and the classification of adjustable gear-lever mechanisms of periodic rotation. *Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Mashinostroenie — Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering*, iss. 1 (41), pp. 181–184. (Un Russ.).
- [6] Zheng F., Hua L., Han X., Li B., Chen D. Synthesis of indexing mechanisms with non-circular gears. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, vol. 105, pp. 108–128.
- [7] Briskin E.S., Prikhodko A.A., Smelyagin A.I. On mathematical modeling of the dynamics of a planetary reciprocating-rotary mixing device. *Izvestija Volgogradskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta — Proceedings of the Volgograd State Technical University*, 2017, iss. 14 (209), pp. 11–18. (In Russ.).
- [8] Prikhodko A.A., Novitsky A.V. Structural and kinematic analysis of the reciprocating motion actuator. *VIII International Conference "Problems of Mechanics of Modern Machines"*, Ulan-Ude, 2022, pp. 542–547. (In Russ.).
- [9] Ottaviano E., Mundo D., Danieli G.A., Ceccarelli M. Numerical and experimental analysis of non-circular gears and cam-follower systems as function generators. *Mechanism and machine theory*, 2008, vol. 43, no. 8, pp. 996–1008.
- [10] Litvin F.L., Gonzalez-Perez I., Fuentes A., Hayasaka K. Design and investigation of gear drives with non-circular gears applied for speed variation and generation of functions. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 2008, vol. 197, no. 45–48, pp. 3783–3802.
- [11] Litvin F.L., Fuentes A. *Gear geometry and applied theory*. Cambridge, Cambridge University Press, 2004, 800 c.

Собственные колебания вязкоупругой ребристой усеченной конической оболочки

И.И. Сафаров¹

safarov54@mail.ru

М.Х. Тешаев²

М.Р. Ишмаматов³

Н.Р. Кулмуратов³

¹Ташкентский химико-технологический институт, Ташкент Узбекистан

²Бухарский инженерно-технологический институт, Бухара, Узбекистан

³Навоийский государственный горно-технологический университет, Навои, Узбекистан

Рассматриваются собственные колебания вязкоупругой ребристой усеченной конической оболочки. Получены геометрически нелинейные математические модели деформирования ребристых конических оболочек с учетом дискретного введения ребер. На основе метода конечных элементов разработана методика решения и алгоритм уравнений собственных колебаний вязкоупругой ребристой усеченной конической оболочки с шарнирно и свободно опертыми краями. Задача сводится к

решению однородных алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами большого порядка.

Ключевые слова: коническая оболочка, панель, нелинейная модель, колебания, вязкоупругость

Литература

Абовский Н.П. Ребристые оболочки. Красноярск, 1967, 61 с.

Proper Vibrations of a Viscoelastic Ribbed Truncated Conical Shell

*I.I. Safarov*¹

safarov54@mail.ru

*M.Kh. Teshayev*²

*M.R. Ishmatov*³

*N.R. Kulmuratov*³

¹Tashkent Institute of Chemical Technology, Tashkent, Uzbekistan

²Bukhara engineering-technological institute, Bukhara, Uzbekistan

³Navoi state university of mining and technology, Navoi, Uzbekistan

The proper oscillations of a viscoelastic ribbed truncated conical shell are considered. Geometrically nonlinear mathematical models of deformation of ribbed conical shells are obtained, taking into account the discrete introduction of edges. Based on the finite element method, a method for solving and an algorithm for the equations of natural oscillations of a viscoelastic ribbed truncated conical shell with hinged and freely supported edges has been developed. The problem is reduced to solving homogeneous algebraic equations with complex coefficients of large order.

Keywords: conical shell, panel, nonlinear model, vibrations, visco-elasticity

Reference

Abovsky N.P. Ribbed shells. Krasnoyarsk, 1967, p. 61.

Построение центрады некруглого зубчатого колеса с внутренними зубьями в паре с овальной шестерней

Э.Ю. Азизов

azizoved@gmail.com

А.А. Приходько

КубГТУ, Краснодар, Россия

Рассмотрена зубчатая передача внутреннего зацепления с некруглыми зубчатыми колесами, в которой ведущим звеном является шестерня с внешними зубьями, имеющая овальный профиль. Центрада колеса с внутренними зубьями строится из

условия вращения колес без проскальзывания, что соответствует равенству линейных скоростей в точке зацепления для каждого колеса. Представлены выражения для определения функции радиуса некруглого колеса в полярных координатах, на базе которых построены примеры центроид для различных параметров передачи: эксцентриситетов ведущей овальной шестерни и количества ее оборотов вокруг своей оси для получения одного оборота колеса с внутренними зубьями.

Ключевые слова: овальное зубчатое колесо, кинематика, внутреннее зацепление

Передачи некруглыми зубчатыми колесами в последнее время вызывают широкий интерес инженеров и изобретателей, обусловленный значительными успехами в анализе [1, 2] и проектировании [3] таких механизмов, а также удешевлением и совершенствованием технологии их изготовления [4, 5].

Наиболее часто данный вид передач применяют для реализации нелинейной передаточной функции [6], при этом включение некруглых колес в схемы планетарных механизмов позволяет реализовать различные виды движения выходного звена: неравномерное, движение с остановками, возвратно-вращательное движение [6–8].

Самыми распространенными являются передачи некруглыми колесами с внешним зубчатым зацеплением, однако большое количество работ посвящено также механизмам с внутренним зацеплением и коническим передачам. Большим преимуществом передач внутреннего зацепления перед передачами внешнего зацепления является их компактность.

Целью настоящей работы является построение и анализ центроид некруглых зубчатых колес передачи внутреннего зацепления, в которой ведущей является овальная шестерня 1 (рис. 1).

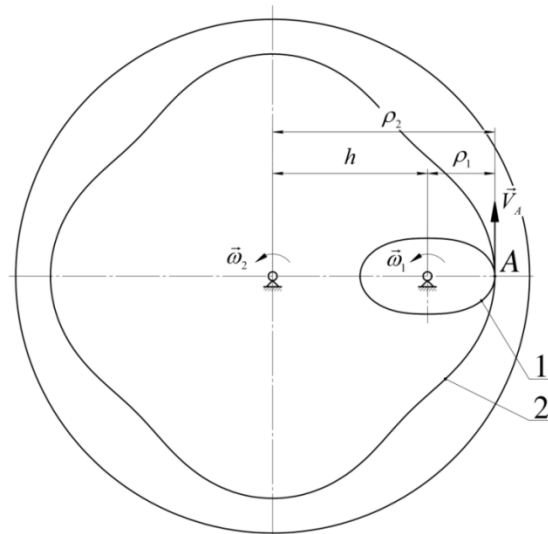


Рис. 1. Расчетная схема пары зубчатых колес: 1 — овальное зубчатое колесо с внешними зубьями, 2 — некруглое зубчатое колесо с внутренними зубьями

Центроида зубчатого колеса 2 представляет собой зависимость $\rho_2(\varphi_2)$.
Скорость точки A , общей для колес 1 и 2, определится:

$$V_A = \omega_1 \rho_1 = \omega_2 \rho_2, \quad (1)$$

где ω_1 , ω_2 — угловые скорости колес 1 и 2; ρ_1 , ρ_2 — радиусы центроид колес 1 и 2.

На рис. 1 видно, что $\rho_2 = \rho_1 + h$. Преобразуем (1) и получим:

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\rho_1}{\rho_1 + h}, \quad (2)$$

где h — межосевое расстояние.

Преобразуем (2) с учетом $\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{d\varphi_2}{d\varphi_1}$ и получим:

$$\varphi_2 = \int \frac{\rho_1(\varphi_1)}{\rho_1(\varphi_1) + h} d\varphi_1. \quad (3)$$

Межосевое расстояние h выбирается из условия $\varphi_2(n \cdot 2\pi) = 2\pi$, для передачи с двумя оборотами овального колеса вокруг своей оси $n = 2$.

Радиус центроида овального зубчатого колеса определяется из уравнения овала в полярных координатах [9]:

$$\rho_1(\varphi_1) = \frac{p}{1 - e \cos 2\varphi_1}, \quad (4)$$

где p — фокальный параметр овала; e — эксцентриситет овала.

Использование выражений (3), (4) позволило определить межосевые расстояния и построить центроиды некруглых зубчатых колес с внутренними зубьями для вариантов передач с различными эксцентриситетами овального зубчатого колеса (рис. 2).

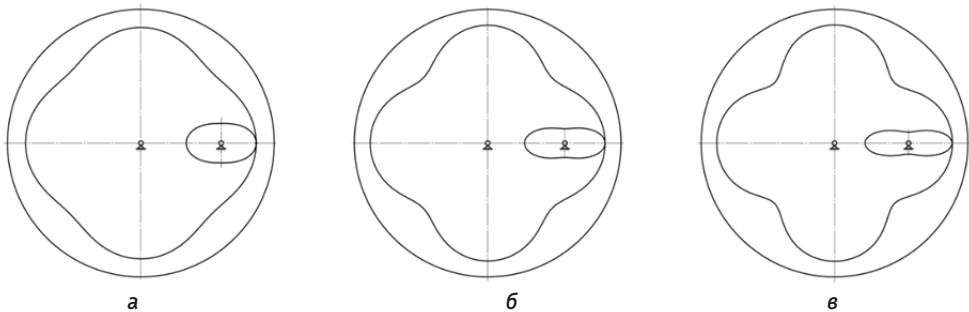


Рис. 2. Варианты передач некруглыми колесами с различными эксцентриситетами овальной шестерни: $e = 0.28$ (а), $e = 0.475$ (б), $e = 0.6$ (в)

Анализ полученных передач показал, что при увеличении эксцентриситета овальной шестерни межосевое расстояние передачи уменьшается.

В качестве примера также исследованы передачи с различным числом оборотов овального колеса за один цикл, эксцентриситет колеса принят $e = 0,475$ (рис. 3).

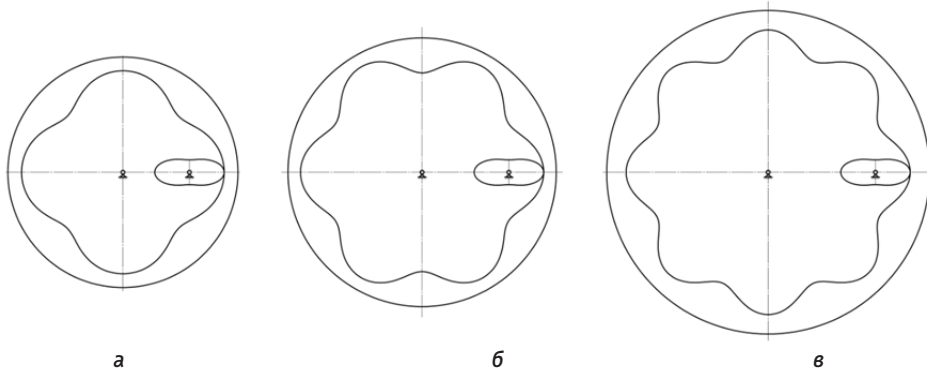


Рис. 3. Варианты передач некруглыми колесами с различным числом оборотов овальной шестерни: $n = 2$ (а), $n = 3$ (б), $n = 4$ (в)

Полученные зависимости для построения центров некруглых зубчатых колес с внутренними зубьями и представленные схемы передач могут использоваться как в механизмах с неподвижными осями вращения для генерации нелинейных передаточных функций, так и в планетарных механизмах для получения различных видов движения выходного вала.

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента РФ (СП-4790.2022.1) и с использованием оборудования ЦКП «Исследовательский центр пищевых и химических технологий» КубГТУ (СКР_3111), развитие которого было поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2021-679).

Литература

- [1] Брискин Е.С., Приходько А.А., Смелягин А.И. О математическом моделировании динамики планетарного возвратно-вращательного перемешивающего устройства. *Известия Волгоградского государственного технического университета*, 2017, № 14 (209), с. 11–18.
- [2] Пожбелко В.И., Шагиахметов А.И., Ахметшин Н.И. Новый способ регулирования угла выстоя и классификация регулируемых зубчато-рычажных механизмов периодического поворота. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*, 2005, № 1 (41), с. 181–184.
- [3] Приходько А.А., Смелягин А.И. Планетарный механизм преобразования вращательного движения в возвратно-вращательное. Пат. 2616457 РФ, МПК F16H 19/08. 2016111033, заявлено 24.03.2016; опубл. 17.04.2017, бюл. № 11.
- [4] Chang S.L., Tsay C.B., Wu L.I. Mathematical model and undercutting analysis of elliptical gears generated by rack cutters. *Mechanism and Machine Theory*, 1996, т. 31, № 7, с. 879–890.

- [5] Bair B.W. Computerized tooth profile generation of elliptical gears manufactured by shaper cutters. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 122, no. 2–3, pp. 139–147.
- [6] Litvin F.L., Gonzalez-Perez I., Fuentes A., Hayasaka K. Design and investigation of gear drives with non-circular gears applied for speed variation and generation of functions. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 2008, vol. 197, no. 45–48, pp. 3783–3802.
- [7] Zheng F., Hua L., Han X., Li B., Chen D. Synthesis of indexing mechanisms with non-circular gears. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, vol. 105, pp. 108–128.
- [8] Приходько А.А., Смелягин А.И., Герасименко Е.О., Сонин С.А. Перемешивающее устройство с возвратно-вращательным движением рабочего органа. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 2017, № 4, с. 84–87.
- [9] Litvin F.L., Fuentes A. *Gear geometry and applied theory*. Cambridge university press, 2004, 800 p.

Construction of the Centroid of a Non-Circular Gear with Internal Teeth Paired with an Oval Gear

E.Yu. Azizov

azizoved@gmail.com

A.A. Prikhodko

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

The paper considers an internal gear transmission with non-circular gears, in which the leading link is a gear with external teeth having an oval profile. The centroid of a wheel with internal teeth is constructed from the condition of wheel rotation without slip, which corresponds to the equality of linear velocities at the engagement point for each wheel. Expressions are presented for determining the function of the radius of a non-circular wheel in polar coordinates, on the basis of which examples of centroids are constructed for various transmission parameters: the eccentricities of the leading oval gear and the number of its revolutions around its axis to obtain one revolution of a wheel with internal teeth.

Keywords: oval gear, kinematics, internal gearing

References

- [1] Briskin E.S., Prikhodko A.A., Smelyagin A.I. On mathematical modeling of the dynamics of a planetary reciprocating-rotary mixing device. *Izvestija Volgogradskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta — Proceedings of the Volgograd State Technical University*, 2017, iss. 14 (209), pp. 11–18. (In Russ.).
- [2] Pozhbelko V.I., Shagiakhmetov A.I., Akhmetshin N.I. A new way to control the dwell angle and the classification of adjustable gear-lever mechanisms of periodic rotation. *Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie — Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering*, 2005, iss. 1 (41), pp. 181–184. (In Russ.).
- [3] Prikhodko A.A., Smelyagin A.I. *Planetary mechanism of converting rotational motion into rotationally reciprocating motion*. Pat. 2616457 RF, IPC F16H 19/08. 2016111033, decl. 24.03.2016; publ. 17.04.2017, Bul. № 11. (In Russ.).
- [4] Chang S.L., Tsay C.B., Wu L.I. Mathematical model and undercutting analysis of elliptical gears generated by rack cutters. *Mechanism and Machine Theory*, 1996, т. 31, № 7, с. 879–890.
- [5] Bair B.W. Computerized tooth profile generation of elliptical gears manufactured by shaper cutters. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 122, no. 2–3, pp. 139–147.

- [6] Litvin F.L., Gonzalez-Perez I., Fuentes A., Hayasaka K. Design and investigation of gear drives with non-circular gears applied for speed variation and generation of functions. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 2008, vol. 197, no. 45–48, pp. 3783–3802.
- [7] Zheng F., Hua L., Han X., Li B., Chen D. Synthesis of indexing mechanisms with non-circular gears. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, vol. 105, pp. 108–128.
- [8] Prikhodko A.A., Smelyagin A.I., Gerasimenko E.O., Sonin S.A. Mixing device with reciprocating rotational movement of the working body. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Pishhevaja tehnologija — News of institutes of higher education. Food Technology*, 2017, no. 4, pp. 84–87.
- [9] Litvin F.L., Fuentes A. *Gear geometry and applied theory*. Cambridge university press, 2004, 800 p.

Колебания систем, состоящих из подземных трубопроводов и колодцев, при различном действии сейсмической волны

С.Б. Хусаинов¹

saparboy.xusainov@mail.ru

Р.Б. Хусаинов²

r.khusainov89@yandex.com

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

² Институт механики и сейсмостойкости сооружений имени М.Т. Уразбаева АН РУз, Ташкент, Узбекистан

Представлен анализ динамического отклика подземной магистральной трубы при действии продольной волны в грунте, распространяющейся вдоль трубы. Рассматривается задача о воздействии продольной волны на систему, состоящую из последовательно расположенных колодцев и трубопроводов конечной длины, взаимодействующую с грунтом по упруго-вязкому закону. Торцы трубопровода закреплены к массивным колодцам, имеющим объем и массу. В зависимости от длины трубопровода, реакция трубопровода на сейсмическое воздействие будет разной. Это особенно очевидно в граничных точках. Учет массы узлов приводит, в значительной мере, к уменьшению деформации трубопровода относительно деформации грунта в граничных точках.

Ключевые слова: трубопровод, грунт, взаимодействие, пластичность, вязкость, упругость, напряжение, деформация

Введение. Увеличение объемов и географии добычи и транспортировки нефти и газа, ускоренный рост городов и поселков городского типа, где используются преимущественно подземные коммуникационные системы жизнеобеспечения, приводят к расширенному строительству сетей подземных трубопроводных систем, в том числе, строительству подземных трубопроводов в районах с высокой сейсмичностью.

Высокая степень зависимости нормальной жизнедеятельности городов, особенно крупных, от бесперебойной работы таких систем жизнеобеспечения, как энергетические и транспортные системы водоснабжения и канализации, возможность появления различных вторичных повреждений в случае разрушения их при землетрясении, возможность возникновения пожаров и опасного загрязнения экологической среды в случае повреждения крупных

газо- и нефтепроводов требует безусловной надежности проектирования и строительства трубопроводных систем.

Сегодня, в развитом мире исследование сейсмостойкости подземных трубопроводов остается актуальной задачей, несмотря на то, что в данной области проведены огромные работы. Многими зарубежными и отечественными учеными проведены научные работы по исследованию колебаний подземных трубопроводов. Но в этих исследованиях не учтены такие важные детали, как колебания самого колодца, имеющего массу и объем.

Подземные трубопроводы являются ключевым компонентом важнейших систем жизнеобеспечения, таких как водоснабжение, газ и жидкое топливо, канализация, электроснабжение, телекоммуникации. Взаимодействие со структурой почвы, вызванное сейсмическими волнами, оказывает важное влияние на поведение трубопровода, а при интеграции по всей сети трубопроводов — на производительность системы [1, 2].

В работе [2] впервые учтено проскальзывание трубы относительно окружающего грунта при распространении сейсмической волны; выведено дифференциальное уравнение продольных колебаний трубопровода и получено его решение для конечного и полубесконечного трубопровода при гармонической и импульсной нагрузках. Экспериментально установлено, что закон взаимодействия подземных сооружений с различными грунтами в общем случае носит нелинейный характер. Определены параметры, характеризующие нелинейные, упругие, пластичные и вязкие свойства взаимодействия подземного трубопровода с грунтом [3].

В работе [4] проведены исследования влияния упруго-пластических свойств взаимодействия на сейсмические колебания системы подземных трубопроводов, в качестве расчетной схемы которой выбрана система с конечным числом степеней свободы.

В работе [5] на основе волновой теории сформулирована одномерная связанная задача сейсмостойкости подземных трубопроводов при сейсмических воздействиях. В работе [6] для описания динамической деформации грунта принята упруговязкопластическая модель Г.М. Ляхова. Система дифференциальных уравнений в частных производных гиперболического типа, описывающая волновой процесс, решена методом характеристик и методом конечных разностей по неявной схеме. Численным решением получено изменение волновых параметров по времени для различных участков слоя грунта.

В работах [7–11] проанализировано использование различных механических математических моделей и решен ряд актуальных задач подземных и наземных сооружений. В [12] изучены колебания подземного трубопровода с учетом вязко-упруго-пластического взаимодействия с грунтом; пластические свойства взаимодействия учитываются по модели сухого трения, предложенной в работах [13, 14]. В работах [15–23] подробно изучено влияние коэффициентов упругости, вязкости и пластичности взаимодействия трубопровода

на контакте с грунтом на напряженно-деформированное состояние подземного трубопровода. В работах [19, 22] подробно изучено влияние сил инерции на деформированное состояние подземного трубопровода. В [24] рассмотрено влияние сейсмической волны на подземный трубопровод.

Постановка задачи. Рассмотрим задачу о воздействии продольной волны на систему, состоящую из последовательно расположенных колодцев и трубопроводов конечной длины, взаимодействующую с грунтом по упруго-вязкому закону. Торцы трубопровода закреплены к массивным колодцам, имеющим объем и массу. Сначала рассмотрим случай, когда три колодца и трубопровод расположены в виде, показанном на рис. 1. Считаем, что для каждого участка трубопровода, ограниченного колодцами, характеристики грунта и трубопровода разные.

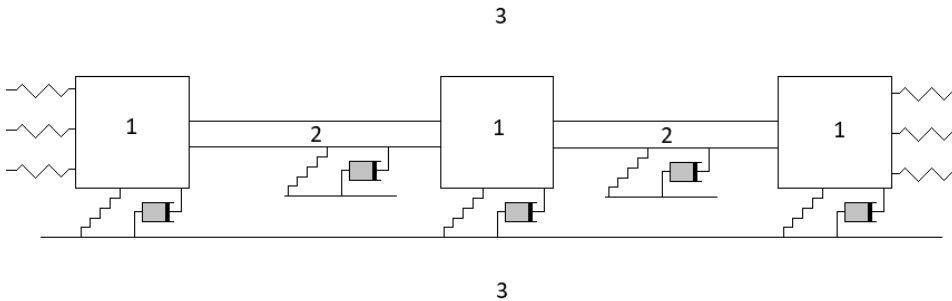


Рис. 1. Схема обтекания продольной волной трубопровода конечной длины, сопряженного с массивными узлами

Для упрощения постановки задачи принимаем следующее: наличие трубопровода не влияет на волновое поле вблизи него.

Поскольку волновое поле за фронтом поверхностной волны зависит от глубины грунтовой среды, рассмотрим осредненные смещения частиц грунтовой среды вдоль оси трубопровода.

Внешняя поверхность трубопровода контактирует с грунтом вдоль оси трубопровода по упруго-вязкому закону, а торцы трубопровода сопряжены с массивными узлами через упругие элементы. С учетом этих предположений уравнение продольных колебаний трубопровода и граничные условия записываются в следующем виде:

$$\rho F_1 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - EF_1 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \pi D_1 k_1 (u - u_g) + \frac{\pi D_1 \mu_1}{H} \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial t} \right) = 0, \quad 0 < x < l_1; \quad (1)$$

$$\rho F_2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - EF_2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \pi D_2 k_2 (u - u_g) + \frac{\pi D_2 \mu_2}{H} \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial t} \right) = 0, \quad l_1 < x < l_2; \quad (2)$$

$$m_1 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = EF_1 \frac{\partial u}{\partial x} - E_g F_g \frac{\partial u_g}{\partial x} - F_h k_3 (u - u_g) - \frac{F_h \mu_3}{H} \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial t} \right) \quad \text{при } x = 0; \quad (3)$$

$$m_2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -EF_1 \frac{\partial u^-}{\partial x} + EF_2 \frac{\partial u^+}{\partial x} - E_g F_g \frac{\partial u_g^-}{\partial x} + E_g F_g \frac{\partial u_g^+}{\partial x} - F_h k_4 (u - u_g) - \frac{F_h \mu_4}{H} \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial t} \right) \quad \text{при } x = l_1; \quad (4)$$

$$m_3 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -EF_2 \frac{\partial u}{\partial x} + E_g F_g \frac{\partial u_g}{\partial x} - F_h k_5 (u - u_g) - \frac{F_h \mu_5}{H} \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial t} \right) \quad (5)$$

при $x = l_1 + l_2$,

где $u(x, t)$ — продольное перемещение произвольного сечения трубопровода; $u_g(x, t) = A \cdot \sin \omega(t - x / C_p) H(t - x / C_p)$ — перемещение частиц грунта за фронтом волны, распространяющейся со скоростью C_p ; A — максимальное смещение грунта; ω — угловая скорость колебаний сейсмической волны, определяемая по формуле $\omega = 2\pi / T$; C_p — «кажущаяся скорость» распространения волны (далее — скорость распространения волны в грунте). «Кажущаяся скорость» распространения волны в грунте может быть большей за счет угла падения волны к оси трубопровода или за счет деформативности стыков трубопровода, $H(z)$ — функция Хевисайда; E и ρ — модуль Юнга и плотность материала трубопровода; E_g — модуль Юнга грунта, F_g — площадь поперечного сечения массивных узлов в форме параллелепипеда перпендикулярного к оси трубопровода, F_h — площадь поперечного сечения массивных узлов в форме параллелепипеда параллельного к поверхности земли, m_1 , m_2 и m_3 — массы узлов; k_1 и k_2 — коэффициенты упругого сопротивления системы «труба — грунт» соответственно первого и второго участков системы трубопроводов; k_3 , k_4 и k_5 — коэффициенты упругого сопротивления системы «колодец — грунт» соответственно первого, второго и третьего колодцев (узлов); μ_1 и μ_2 — коэффициенты вязкого взаимодействия системы «труба-грунт» соответственно первого и второго участков системы трубопроводов; μ_3 , μ_4 и μ_5 — коэффициенты вязкого взаимодействия системы «колодец — грунт» соответственно первого, второго и третьего колодцев (узлов).

Начальные условия нулевые, т. е.

$$u = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad \text{при } t = 0. \quad (5)$$

Методы решения. Для решения уравнений (1) и (2) используем следующую неявную схему метода конечных разностей второго порядка точности [25]:

$$\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{t}^2} \approx \frac{\bar{u}_i^{j+1} - 2\bar{u}_i^j + \bar{u}_i^{j-1}}{\tau^2}; \quad \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{x}^2} \approx \frac{\bar{u}_{i+1}^{j+1} - 2\bar{u}_i^{j+1} + \bar{u}_{i-1}^{j+1}}{h^2}, \quad (9)$$

где τ и h — шаг по времени и шаг по координате.

Частные производные по времени и по координате, и перемещению аппроксимируются в следующем виде:

$$\frac{\partial u}{\partial \bar{t}} \approx \frac{u_i^{j+1} - u_i^{j-1}}{2\tau}; \quad \frac{\partial u}{\partial \bar{x}} \approx \frac{u_{i+1}^j - u_{i-1}^j}{2h}. \quad (10)$$

Перемещения аппроксимируются в следующем виде:

$$u \approx \frac{u_i^{j+1} + u_i^{j-1}}{2}. \quad (11)$$

Аппроксимации дифференциалов функции по времени и по координате (9), (10) и (11) дифференциальных уравнений (6)–(8) примут следующий вид:

$$u_i^{j+1} = \left(-c_2 u_i^{j-1} - c_3 u_i^j + c_4 (u_{i-1}^j + u_{i+1}^j) + c_5 (u_{gi}^{j+1} + u_{gi}^{j-1}) + c_6 (u_{gi}^{j+1} - u_{gi}^{j-1}) \right) / c_1. \quad (12)$$

Здесь $c_1 = \frac{\rho F_i}{\tau^2} + \frac{\pi D_i \mu_i}{2\tau H} + \frac{\pi D_i k_i}{2}$; $c_2 = \frac{\rho F_i}{\tau^2} - \frac{\pi D_i \mu_i}{2\tau H} + \frac{\pi D_i k_i}{2}$; $c_3 = 2 \left(\frac{EF_i}{h^2} - \frac{\rho F_i}{\tau^2} \right)$;

$$c_4 = \frac{EF_i}{h^2}; \quad c_5 = \frac{\pi D_i k_i}{2}; \quad c_6 = \frac{\pi D_i \mu_i}{2\tau H}.$$

Для аппроксимации частного производного от перемещения по координате на границах используем метод (способ) «фиктивной точки». Остановимся на записи разностной схемы в нерегулярных узлах (на границе или вблизи нее). В этих узлах для записи разностных уравнений необходимо привлекать краевые условия [25].

Рассмотрим способ написания разностного краевого условия с точностью $O(h^2)$. Уравнения (1) и (2) аппроксимируем, используя явную схему.

Используем способ фиктивных точек. Данный способ очень нагляден. Введем вне отрезка $0 < x < l_1$ фиктивную точку $x_{-1} = x_0 - h$ и будем считать исходное уравнение справедливым при $x_{-1} \leq x$. Тогда разностное уравнение (1) можно написать при $i = 0$:

$$\begin{aligned} & \rho F_1 \frac{1}{\tau^2} (u_0^{j+1} - 2u_0^j + u_0^{j-1}) - EF_1 \frac{1}{h^2} (u_1^j - 2u_0^j + u_{-1}^j) + \\ & + \pi D_1 k_1 \left(\frac{u_0^{j+1} + u_0^{j-1}}{2} \right) + \frac{\pi D_1 \mu_1}{H} \left(\frac{u_0^{j+1} - u_0^{j-1}}{2\tau} \right) = G_0^j H(\tau j), \end{aligned}$$

где $G_0^j = \pi D_1 k_1 A \sin(\omega \tau \cdot j) + \frac{\pi D_1 \mu_1}{H} A \omega \cos(\omega \tau \cdot j)$.

Заменим в левом краевом условии (3) производную симметричной разностью

$$m_1 \frac{1}{\tau^2} (u_0^{j+1} - 2u_0^j + u_0^{j-1}) = EF_1 \frac{1}{2h} (u_1^j - u_{-1}^j) - F_h k_3 \left(\frac{u_0^{j+1} + u_0^{j-1}}{2} \right) - \frac{F_h \mu_3}{H} \left(\frac{u_0^{j+1} - u_0^{j-1}}{2\tau} \right) + W_0^j \text{ при } i = 0;$$

где $W_0^j = -E_g F_g \frac{A \omega}{C_p} \cos(\omega \tau j) + F_h k_3 A \sin(\omega \tau j) + \frac{F_h \mu_3}{H} A \omega \cos(\omega \tau j)$.

Исключая из последних двух уравнений фиктивную точку, получим разностный аналог краевого условия:

$$\left(\frac{\rho F_1}{\tau^2} + \frac{2m_1}{h\tau^2} \right) (u_0^{j+1} - 2u_0^j + u_0^{j-1}) - \frac{2EF_1}{h^2} (u_1^j - u_0^j) + \left(\frac{F_h k_3}{h} + \frac{\pi D_1 k_1}{2} \right) (u_0^{j+1} + u_0^{j-1}) + \left(\frac{F_h \mu_3}{h\tau H} + \frac{\pi D_1 \mu_1}{2\tau H} \right) (u_0^{j+1} - u_0^{j-1}) = \left(G_0^j - \frac{2}{h} W_0^j \right) H(\tau j).$$

Раскрывая скобки и собирая коэффициенты с одинаковыми переменными, получаем:

$$u_0^{j+1} = \frac{-B_1 u_0^{j-1} + C_1 u_0^j + D_1 (u_1^j - u_0^j) + \left(G_0^j - \frac{2}{h} W_0^j \right) H(\tau j)}{A_1},$$

здесь $A_1 = \frac{\rho F_1}{\tau^2} + \frac{2m_1}{h\tau^2} + \frac{F_h k_3}{h} + \frac{\pi D_1 k_1}{2} + \frac{F_h \mu_3}{h\tau H} + \frac{\pi D_1 \mu_1}{2\tau H}$; $B_1 = \frac{\rho F_1}{\tau^2} + \frac{2m_1}{h\tau^2} + \frac{F_h k_3}{h} + \frac{\pi D_1 k_1}{2} - \frac{F_h \mu_3}{h\tau H} - \frac{\pi D_1 \mu_1}{2\tau H}$; $C_1 = 2 \left(\frac{\rho F_1}{\tau^2} + \frac{2m_1}{h\tau^2} \right)$; $D_1 = \frac{2EF_1}{h^2}$.

Затем, это уравнение содержит только одно значение с нового слоя u_0^{j+1} , т. е. оно явное.

Точно так же определяем u_N^{j+1} для узла, соединяющего первый и второй трубопроводы, и u_k^{j+1} для правой границы участка второго трубопровода длиной l_2 .

Введем вне отрезка $0 < x < l_2$ фиктивную точку $x_{k+1} = x_k + h$ и будем считать исходное уравнение справедливым при $x_{k+1} \geq x$:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\rho F_2}{\tau^2} + \frac{2m_3}{h\tau^2} \right) (u_k^{j+1} - 2u_k^j + u_k^{j-1}) - \frac{EF_2}{h^2} (u_{k-1}^j - 2u_k^j) - \frac{EF_2}{h^2} u_{k-1}^j + \\ & + \left(\frac{F_h k_5}{h} + \frac{\pi D_2 k_2}{2} \right) (u_k^{j+1} + u_k^{j-1}) + \left(\frac{F_h \mu_5}{h\tau H} + \frac{\pi D_2 \mu_2}{2\tau H} \right) (u_k^{j+1} - u_k^{j-1}) = \\ & = \left(G_k^j + \frac{2}{h} W_k^j \right) H \left(\tau j - \frac{hk}{C_p} \right), \end{aligned}$$

где $G_k^j = \pi D_2 k_2 A \sin(\omega(\tau j - hk / C_p)) + (\pi D_2 \mu_2 / H) A \omega \cos(\omega(\tau j - hk / C_p))$;

$$\begin{aligned} W_k^j &= -E_g F_g \frac{A\omega}{C_p} \cos(\omega(\tau j - hk / C_p)) + F_h k_5 A \sin(\omega(\tau j - hk / C_p)) + \\ & + \frac{F_h \mu_5}{H} A \omega \cos(\omega(\tau j - hk / C_p)). \end{aligned}$$

Раскрывая скобки и собирая коэффициенты с одинаковыми переменными, получаем:

$$u_k^{j+1} = \frac{-B_3 u_k^{j-1} + C_3 u_k^j + D_3 (u_{k-1}^j - u_k^j) + \left(G_k^j - \frac{2}{h} W_k^j \right) \cdot H \left(\tau j - \frac{hk}{C_p} \right)}{A_3}.$$

$$\begin{aligned} \text{Здесь } A_3 &= \frac{\rho F_2}{\tau^2} + \frac{2m_3}{h\tau^2} + \frac{F_h k_5}{h} + \frac{\pi D_2 k_2}{2} + \frac{F_h \mu_5}{h\tau H} + \frac{\pi D_2 \mu_2}{2\tau H}; \quad B_3 = \frac{\rho F_2}{\tau^2} + \frac{2m_3}{h\tau^2} + \frac{F_h k_5}{h} + \\ & + \frac{\pi D_2 k_2}{2} - \frac{F_h \mu_5}{h\tau H} - \frac{\pi D_2 \mu_2}{2\tau H}; \quad C_3 = 2 \left(\frac{\rho F_2}{\tau^2} + \frac{2m_3}{h\tau^2} \right); \quad D_3 = \frac{2EF_2}{h^2}. \end{aligned}$$

Результаты и обсуждение. Напряженно-деформированное состояние подземного трубопровода в виде системы из подземных труб и узлов, имеющей форму параллелепипеда и массу, весьма сложный процесс. Состояние подземного трубопровода зависит не только от параметров трубы и грунта, но и от параметров узла. Мы знаем, что вес узла значительно больше погонного веса трубопровода. Многими учеными изучены отдельные (свободные) колебания узла как материальной точки на шероховатой поверхности, при этом не учитывается действие трубопровода на узел. Мы сначала рассмотрим задачу, в которой перемещения системы «труба — грунт» не выходят за пределы упругости.

Рассмотрим случай, когда длина волны в грунте, т. е. сейсмическая волна принимается в виде гармонической функции синуса, больше длины участков первого и второго трубопроводов.

Характеристики трубы, колодца и грунта принимаем следующими: плотность, $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$, модуль Юнга, $E = 2,1 \cdot 10^8 \text{ кН/м}^2$, длина $l_1 = 30 \text{ м}$ и $l_2 = 50 \text{ м}$, диаметр $D_1 = D_2 = 0,2 \text{ м}$, толщина $s = 0,005 \text{ м}$, коэффициент упруго-

го взаимодействия системы «труба — грунт» $k_1 = k_2 = 1,10^7 \text{ Н/м}^3$, коэффициент вязкого взаимодействия системы «труба — грунт» $\mu_1 = \mu_2 = 100 \text{ кН}\cdot\text{с/м}^2$, скорость распространения волны $C_p = 1000 \text{ м/с}$, период основных колебаний $T = 0,1 \text{ с}$, амплитуда колебаний $A = 0,004 \text{ м}$, модуль Юнга грунта, $E_g = 4 \cdot 10^4 \text{ кН/м}^2$, глубина заложения $H = 1 \text{ м}$, масса первого колодца $m_1 = 100 \text{ кг}$, масса второго колодца $m_2 = 1000 \text{ кг}$, масса третьего колодца $m_3 = 100 \text{ кг}$, размеры колодца: высота 1 м, длина 1 м, ширина 1 м, коэффициент упругого взаимодействия системы «колодец — грунт» $k_3 = k_4 = k_5 = 4 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3$, коэффициент вязкого взаимодействия системы «колодец — грунт» $\mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = 100 \text{ кНс/м}^2$.

Для анализа поведения рассмотрена система, состоящая из последовательно закрепленных трех колодцев и двух участков подземного трубопровода длиной 30 и 50 м соответственно. Сейсмическая волна в грунте принимается в виде бегущей волны синуса; допустим, волна распространяется со скоростью 1000 м/с, период колебания $T = 0,1 \text{ с}$, амплитуда колебания $A = 0,004 \text{ м}$. Оба участка подземного трубопровода из стали одинаковой марки имеют одинаковый диаметр $D = 0,2 \text{ м}$. Масса первого и третьего колодцев по 100 кг, а второй имеет массу 1000 кг. Учитывая выше упомянутые допущения, мы можем найти длину сейсмической волны, она равна $\lambda = C_p \cdot T = 100 \text{ м}$.

Расстояние между колодцами 30 и 50 м, т. е. между колодцами расположены трубопроводы длиной $l_1 = 30$ и $l_2 = 50 \text{ м}$. Длина сейсмической волны больше длины первого $l_1 < \lambda$ и второго $l_2 < \lambda$ участков подземного трубопровода.

На рис. 1, а показано изменение перемещения первого колодца по времени. Отсюда видно, что максимальное перемещение колодца равно приблизительно 0,00375 м, когда максимальное перемещение грунта задается равным 0,004 м. Если эти данные написать в процентном соотношении, они равны 6,25 %.

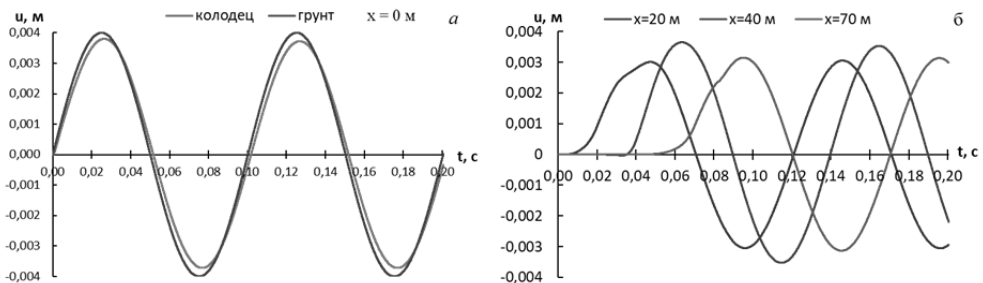


Рис. 2. Изменение перемещения по времени при $x = 0 \text{ м}$ (а) и в сечениях 20, 40 и 70 м (б)

Масса узла значительно влияет на напряженно-деформированное состояние подземного трубопровода, это подтверждает рис. 1, б. Здесь показано перемещение трубопровода в сечениях $x = 20, 40$ и 70 м. Перемещение трубопровода в сечении $x = 40$ м относительно больше остальных.

Теперь рассмотрим случай, при котором длина сейсмической волны меньше или равна длине участков трубопроводов. На рис. 2, а приведена иллюстрация результатов расчета при $C_p = 1000$ и 300 м/с. Видны отличия результатов для разных значений скорости распространения. Длина сейсмической волны при $C_p = 1000$ м/с равна 100 м, а при 300 м/с равна 30 м.

Результаты исследования показывают, что перемещение подземного трубопровода уменьшается с уменьшением скорости распространения волны. На рис. 3, б–г представлены сравнительные графики для двух значений скорости распространения волны, т. е. при $C_p = 300$ и 1000 м/с. Из этих графиков видно, что перемещение трубопровода на $0,75\%$ меньше при $C_p = 300$ м/с, чем при $C_p = 1000$ м/с.

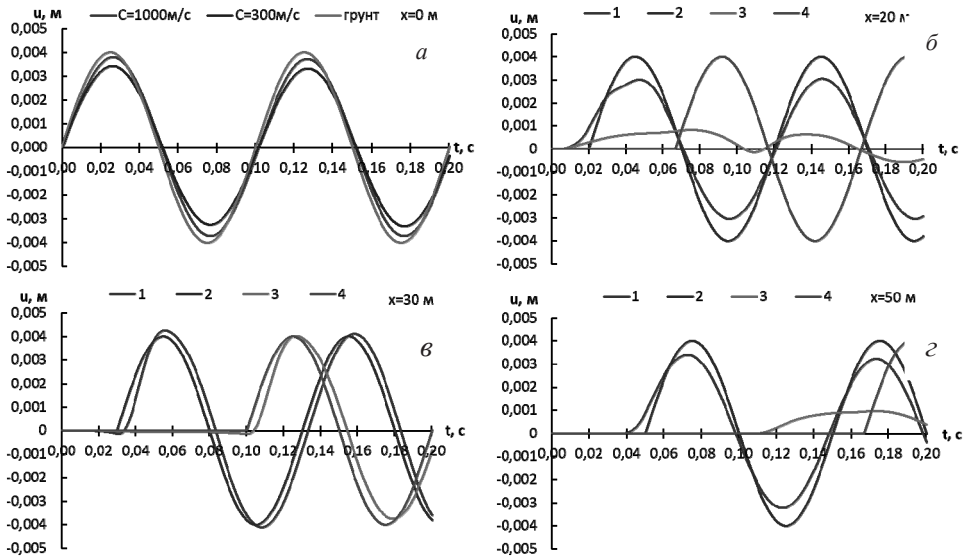


Рис. 3. Изменение перемещения по времени, при $x = 0$ м (а), $x = 20$ м (б), $x = 30$ м (в) и $x = 50$ м (г):

1 — труба при $C_p = 1000$ м/с; 2 — грунт при $C_p = 1000$ м/с; 3 — труба при $C_p = 300$ м/с; 4 — грунт при $C_p = 300$ м/с

На рис. 4, а, б, показаны изменения перемещений по координате при $C = 300$ м/с. Результаты исследования показывают, что до перехода фронта волны в грунте третьего колодца, максимальное перемещение трубопровода приблизительно равно перемещению грунта. Это подтверждает рис. 4, при $t = 0,03$ с фронт волны в грунте достигает сечения $x = 9$ м, а при $t = 0,07$ с достигает сечения $x = 21$ м.

На рис. 5, *а* и *б* показаны результаты для случая, когда длина волны в грунте больше длины трубопроводов, расположенных между узлами. В этом случае перемещение трубопровода и грунта имеет незначительное отличие.

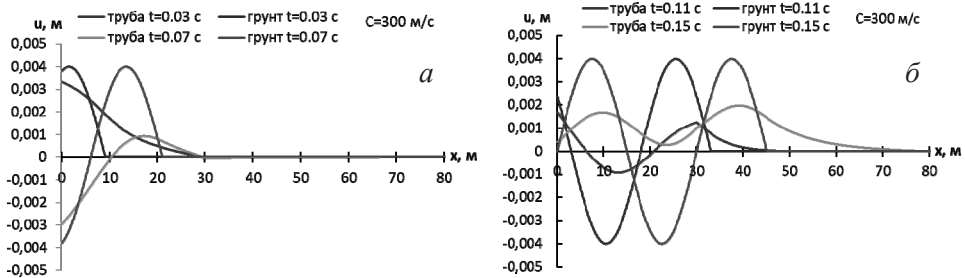


Рис. 4. Изменение перемещений по координате при $C=300$ м/с

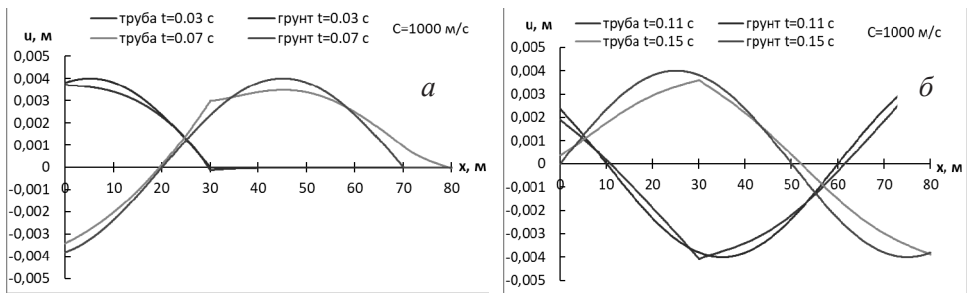


Рис. 5. Изменение перемещений по координате при $C=1000$ м/с

Результаты, показанные на рис. 6, *а* подтверждают ранее сделанные выводы, т. е. при переходе сейсмической волны на участке, расположенном между первым и вторым колодцами, перемещение трубопровода приблизительно равно перемещению в грунте. При переходе сейсмической волны в грунте второго участка трубопровода, ограниченного вторым и третьим колодцами, перемещение трубопровода приблизительно в два раза меньше перемещения, возникающего в грунте (см. рис. 6, *б*).

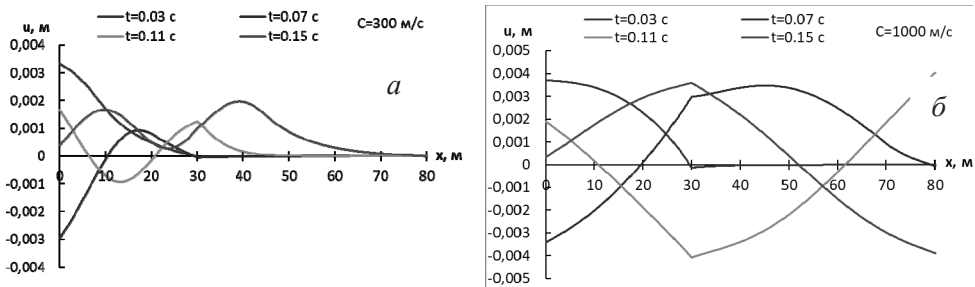


Рис. 6. Изменение перемещений по координате для моментов времени 0,03, 0,07, 0,11 и 0,15 с

Теперь рассмотрим трубопровод длиной 200 м. Длина каждого сегмента трубопровода между узлами равна 100 м. Сейсмическая волна распространяется со скоростью 500 м/с. Массу каждого колодца принимаем по 500 кг. Период сейсмической волны $T = 0,1$ с, коэффициент упругого взаимодействия системы «колодец — грунт» равен следующему $k_3 = k_4 = k_5 = 4 \cdot 10^4$ кН/м³. Поперечные сечения трубопроводов первого и второго участков одинаковые.

Перемещение трубопровода в сечении, расположенном на расстоянии 30 м от первого колодца, в 2,1 раза меньше перемещения грунта (см. рис. 7). На рис. 8 показано перемещение колодцев по времени, отсюда можно увидеть, что перемещение колодца увеличивается на некоторое значение относительно перемещения предыдущего колодца. Разница перемещений между i -й и $i + 1$ -й зависит от ряда параметров, например, от расстояния между колодцами, характеристик материала трубопровода, характеристик сейсмической волны и характеристик колодцев. Учитывая характеристики трубы, колодцев и грунта, можно определить следующие закономерности.

Теперь сравним перемещения трубопровода в сечениях 30, 50 и 90 м на первом участке трубопровода и в сечениях 120, 150 и 180 м на втором участке трубопровода.

Когда фронт волны находится на первом участке трубопровода, второй и третий колодцы находятся в покое, за счет чего на интервале времени, когда фронт волны находится между первым и вторым колодцем, максимальные значения перемещений равны 0,0021 м, а затем максимальные значения перемещений трубопровода уменьшаются до 0,0018 м и остаются неизменными (см. рис. 9, а). Точно такие же явления встречаются в сечениях 120, 150 и 180 м. Здесь тоже до достижения фронта сейсмической волны третьего колодца максимальные значения перемещений равны 0,00235 м и после перехода фронта волны через третий колодец, максимальные значения перемещений стабилизируются и принимают отметку 0,002 м (см. рис. 9, б).

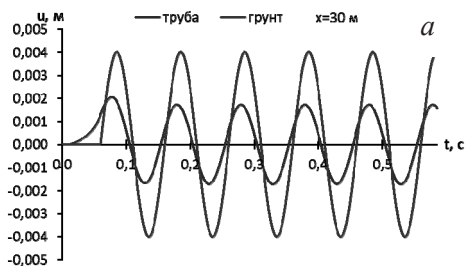


Рис. 7. Изменение перемещений по времени для сечения трубопровода $x = 30$ м

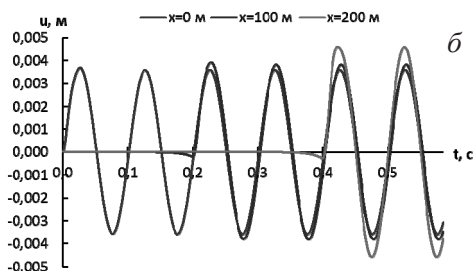


Рис. 8. Изменение перемещений колодцев по времени

Теперь сравним значения перемещений в сечениях $x = 30$ и 120 м. Перемещения при $x = 120$ м больше, чем при $x = 30$ м, это можно объяснить следу-

ющим образом, в сечениях, близко расположенных к колодцам, перемещение будет относительно больше, чем в сечениях, отдаленных от колодцев. К данному выводу привели результаты расчетов, показанные на рис. 10, *а* и *б*.

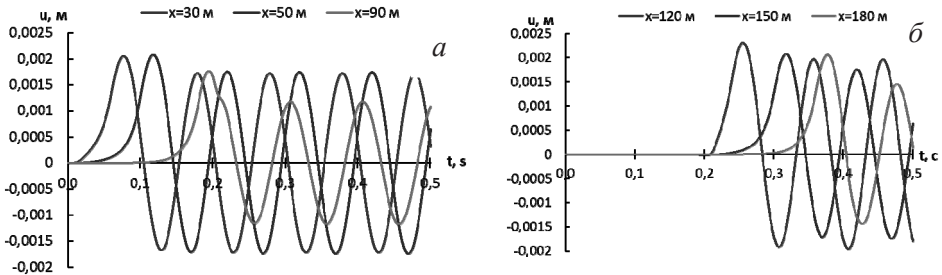


Рис. 9. Изменение перемещений подземного трубопровода по времени

На рис. 11, *а* показано изменение деформации подземного трубопровода по времени для сечений трубопровода $x = 30, 50$ и 90 м. Максимальные значения деформации при $x = 30$ м равны $0,00023$, при $x = 50$ м равны $0,00024$, при $x = 90$ м равны $0,00031$. Чем ближе сечение к колодцу, тем больше деформация трубопровода.

В точках, лежащих близко к окрестности фронта сейсмической волны, значения перемещений на трубопроводе значительно больше, чем в точках, отдаленно расположенных от фронта сейсмической волны.

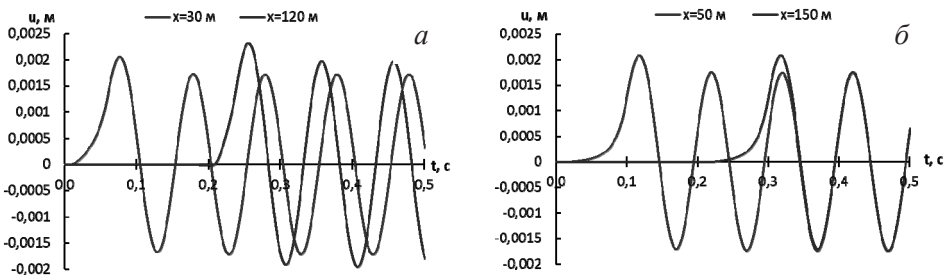


Рис. 10. Изменение перемещений подземного трубопровода по времени

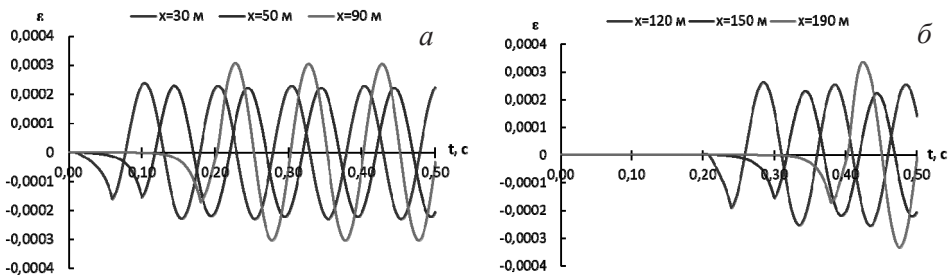


Рис. 11. Изменение деформации по времени

Выводы.

1. Если длина трубопровода, расположенного между колодцами, больше длины сейсмической волны, тогда перемещения, возникающие в ее сечениях, в разы меньше перемещений грунта соответствующей точки.

2. Перемещения в сечениях трубопровода, близко расположенных к колодцу, меньше, чем в сечениях, отдаленных от колодцев.

3. Увеличение габарита колодца приводит к увеличению перемещений колодца до значения, приблизительно равного перемещению грунта в точке, соответствующей координате колодца.

Литература

- [1] O'Rourke T.D. Geohazards and large geographically distributed systems. *Geotechnique*, 2010, vol. 60 (7), pp. 503–543.
- [2] Рашидов Т.Р. *Динамическая теория сейсмостойкости сложных систем подземных сооружений*. — Ташкент, Фан, 1973, 180 с.
- [3] Рашидов Т.Р., Хожметов Г.Х. Сейсмостойкость подземных трубопроводов. Ташкент, Фан, 1985, 152 с.
- [4] Seleznev V.E. Numerical simulation of a gas pipeline network using computational fluid dynamics simulators. *Journal of Zhejiang University Science A*, 2007, vol. 5, no. 5, pp. 755–765.
- [5] Sultanov K.S., Vatin N.I. Wave Theory of Seismic Resistance of Underground Pipelines. *Appl. Sci.*, 2021, vol. 11, no. 4, art. 1797. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11041797>
- [6] Sultanov K.S., Loginov P.V., Ismoilova S.I., Salikhova Z.R. Quasistaticity of the process of dynamic strain of soils. *Magazine of Civil Engineering*, 2019, vol. 85 (1), pp. 71–91.
- [7] Mirsaidov M.M., Sultanov T.Z. Assessment of stress-strain state of earth dams with allowance for non-linear strain of material and large strains. *Mag. Civ. Eng.*, 2014, vol. 49, pp. 73–82. DOI: <https://doi.org/10.5862/MCE.49.8>
- [8] Sayapin S.N., Shkapov P.M. Application of Bauschinger effect during prolonged storage in stressed state of elements of structures made of fiber reinforced plastic. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1301 (1), art. 012014. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1301/1/012014>
- [9] Mirsaidov M M, Abdikarimov R A and Khodzhaev D A 2019 Dynamics of a viscoelastic plate carrying concentrated mass with account of physical nonlinearity of material. *PNRPU Mech Bull*, 2022, vol. 2, pp. 143–155.
- [10] Mirsaidov M and Usarov M 2020 Bimoment theory construction to assess the stress state of thick orthotropic plates. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2020, vol. 614, art. 012090. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/614/1/012090>
- [11] Sultanov K.S.: The attenuation of longitudinal waves in non-linear viscoelastic media. *J. Appl. Math. Mech.*, 2002, vol. 66, pp. 115–122.
- [12] Khusainov R.B. Seismodynamics of Underground Pipelines during Visco-Elastic-Plastic Interaction with Soil. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. JARSET, India, 2020, vol. 7, iss. 1, pp. 12468–12474.
- [13] Султанов К.С. Волновая теория сейсмостойкости подземных сооружений. Ташкент, Фан, 2016, 392 с.
- [14] O'Rourke M.J., Liu X. Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects. *Monograph Series; Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER)*. A National Center of Excellence in Advanced Technology Applications. Buffalo, NY, USA, 1999, 249 p.

- [15] Хусаинов Р.Б. Продольная волна деформации в подземном трубопроводе при вязкоупругом взаимодействии с грунтом. *Журнал ОФМГ*, 2019, № 6, с. 19–23.
- [16] Khusainov R.B. Longitudinal Deformation Wave in Buried Pipeline Subject to Viscoelastic Interaction with Soil. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2020, vol. 56, pp. 420–426. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11204-020-09625-8>
- [17] Хусаинов Р.Б. Поведение подземного магистрального трубопровода при воздействии бегущего импульса в форме треугольника. *Журнал ПВИМ*, 2020, № 1, с. 50–58.
- [18] Хусаинов Р.Б. О необходимости учета волнового уноса энергии в задачах расчета подземных магистральных трубопроводов. *Проблемы механики* (Ташкент), 2018, № 4, с. 107–111.
- [19] Хусаинов Р.Б. Оценка влияния силы инерции на продольные колебания подземных трубопроводов. *Проблемы механики* (Ташкент), 2017, № 4, с. 72–75.
- [20] Хусаинов Р.Б. Анализ продольных колебаний подземного трубопровода при упругом и вязкоупругом взаимодействиях с грунтом при различных граничных условиях. *Проблемы механики* (Ташкент), 2017, № 1, с. 86–90.
- [21] Barna Rakhmankulova, Sayibdjan Mirzaev, Rakhmatjon Khusainov and Saparboy Khusainov. Underground main pipeline behavior under a travelling impulse in the form of a triangle. *International Scientific Conference “Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering” (Conmechhydro — 2021). E3S Web Conf.*, 2021, vol. 264. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126401006>
- [22] Barna Rakhmankulova, Sayibdjan Mirzaev, Sharafidin Aynakulov, Rakhmatjon Khusainov and Saparboy Khusainov. Inertia force effect on longitudinal vibrations of underground pipelines. *International Scientific Conference “Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering” (Conmechhydro — 2021). E3S Web Conf.*, 2021, vol. 264, DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126401007>
- [23] Хусаинов Р.Б., Хусаинов С.Б. Численное решение задачи продольного колебания подземного трубопровода методом конечных разностей. *Проблемы вычислительной и прикладной математики*, 2021, № 2 (32), с. 58–69.
- [24] Ильющин А.А., Рашидов Т. О действии сейсмической волны на подземный трубопровод. *Изв. АН Уз. Серия техн. наук*. Ташкент, 1971, № 1, с. 37–42.
- [25] Калиткин Н.Н. *Численные методы*. Москва, Наука, 1978, 512 с.

Vibrations of Systems Consisting of Underground Pipelines and Wells under Different Seismic Wave Action

B.S. Khusainov¹ **saparboy.xusainov@mail.ru**

B.B. Khusainov² **r.khusainov89@yandex.com**

¹ **Bauman Moscow State Technical University**

² **Institute of Mechanics and Seismic Resistance of Structures named after M.T. Urazbayev of the Academy of Sciences of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan**

The paper presents an analysis of the dynamic response of an underground trunk pipe under the action of a longitudinal wave in the ground propagating along the pipe.

Keywords: pipeline, soil, interaction, plasticity, viscosity, elasticity, stress, deformation

СЕКЦИЯ 5

Научно-методические и исторические вопросы механики

Применение междисциплинарных связей раздела «Механика» с общетехническими дисциплинами при формировании профессиональных компетенций

Э.В. Кондратьева

hkondrateva68@mail.ru

АНО ВО «Российский новый университет», Москва, Россия

Рассмотрены междисциплинарные связи раздела «Механика» дисциплины физика с общетехническими дисциплинами при подготовке специалистов и соответственно формирования профессиональных компетенций. Приведены примеры решения профессиональных задач общетехнических дисциплин с применением законов механики. Необходимо отметить, что изучение студентами общетехнических дисциплин основывается на модульной технологии обучения механики.

Ключевые слова: механика; междисциплинарные связи; общетехнические дисциплины; формирование профессиональных компетенций

Литература

Кондратьева Э.В. Особенности процесса формирования компетенций учащихся технических специальностей учреждений СПО на основе междисциплинарных связей физико-технических дисциплин. *Проблемы современного педагогического образования. Педагогика и психология*, 2017, № 54 (4), с. 90–98.

Application of Interdisciplinary Connections of the Mechanics Section with General Technical Disciplines in the Formation of Professional Competencies

E.V. Kondratieva

hkondrateva68@mail.ru

ANO VO "Russian New University", Moscow, Russia

The report examines the interdisciplinary connections of the Mechanics section of the physics discipline with general technical disciplines in the training of specialists and, accordingly, the formation of professional competencies. Examples of solving professional problems of general technical disciplines using the laws of mechanics are given. It should

be noted that the study of general technical disciplines by students is based on the modular technology of teaching mechanics.

Keywords: mechanics; interdisciplinary connections; general technical disciplines; formation of professional competencies

References

Kondratieva E.V. Features of the process of forming the competencies of students of technical specialties of SPO institutions on the basis of interdisciplinary connections of physical and technical disciplines. *Problems of modern pedagogical education. Pedagogy and Psychology*, 2017, № 54 (4), pp. 90–98. (In Russ.).

Роль понятий и соотношений классической механики в изучении курса общей физики

Д.К. Веретимус

Н.К. Веретимус nkvmhts@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Показано, что основные положения механики: второй закон Ньютона, законы сохранения импульса, момента импульса и полной механической энергии; понятие работы силы; связь работы и потенциальной энергии, связь потенциальной энергии и консервативной силы являются базовыми для изучения других разделов физики.

Ключевые слова: механика, закон, зависимость, физика, энергия

Литература

Веретимус Д.К., Веретимус Н.К., Морозов АюНю (ред.)а. Физические основы механики. Колебания и волны. Элементы специальной теории относительности. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, 135 с.

The Role of Concepts and Relations of Classical Mechanics in the Study of the Course of General Physics

D.K. Veretimus

N.K. Veretimus nkvmhts@yandex.ru

BMSTU, Moscow, Russia

It is shown that the basic principles of mechanics: Newton's second law, the laws of conservation of momentum, angular momentum and total mechanical energy; the concept of force work; the relationship of work and potential energy, the relationship of potential energy and conservative force are basic for the study of other branches of physics.

Keywords: mechanics, law, dependencies, physics, energy.

References

Veretimus D.K., Veretimus N.K., Morozov A.N. (ed.). Physical fundamentals of mechanics. Vibrations and waves. Elements of the special theory of relativity. Moscow, BMSTU Press, 2018, 135 p. (In Russ.).

Моделирование движения универсального шарнира с использованием кватернионов

А.Е. Ламоткин alexey.lamotkin@urfu.ru

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Рассмотрено кватернионное описание сферического движения крестовины универсального шарнира. Закон движения крестовины определяется в двух случаях. В первом случае задан закон вращения ведущего вала $\varphi(t)$, во втором задан момент внешних сил, действующих на крестовину. На основании рассмотренных моделей создана анимация движения универсального шарнира. Кроме того рассматривается способ построения траектории крестовины в \mathbb{R}^3 , основанный на отображении единичных кватернионов на сферу радиусом 2π . Получаемая траектория позволяет дать простую интерпретацию сферического движения крестовины, как движение точки в \mathbb{R}^3 , а также провести дополнительный анализ.

Ключевые слова: универсальный шарнир, кватернион, сферическое движение

Литература

- [1] Mityushov E. A., Misyura N. E. A quaternionic description of kinematics and dynamics universal joint. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1901, art. 012121.
- [2] Lamotkin A.E., Misyura N.E., Mityushov E.A. Designing the program trajectory for steering a spacecraft under arbitrary boundary conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 747 (1), pp. 1–9.

Modeling Universal Joint Movement Using Quaternions

A.E. Lamotkin alexey.lamotkin@urfu.ru

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

The paper considers the quaternion description of the spherical movement of the universal joint cross. The law of movement of the cross is determined in two cases. In the first case, the law of drive shaft rotation $\varphi(t)$ is given, in the second case, the external forces torque acting on the cross is given. Based on the considered models, an animation of the universal

joint movement was created. In addition, a method for constructing the trajectory of the cross in \mathbb{R}^3 is considered, based on the mapping of unit quaternions onto a sphere of radius 2π . The resulting trajectory allows us to give a simple interpretation of the spherical motion of the cross, as the motion of a point in \mathbb{R}^3 , as well as to conduct additional analysis.

Keywords: universal joint, quaternion, spherical motion

References

- [1] Mityushov E. A., Misyura N. E. A quaternionic description of kinematics and dynamics universal joint. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1901, art. 012121.
- [2] Lamotkin A.E., Misyura N.E., Mityushov E.A. Designing the program trajectory for steering a spacecraft under arbitrary boundary conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 747 (1), pp. 1–9.

Вращение твердого тела вокруг неподвижной точки. Системы углов Эйлера

Т.И. Орлянская

tamara.oryanskaya@gmail.com

И.И. Мингалев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассматривается три основных принципа обеспечения правильного выбора углов Эйлера.

Ключевые слова: кинематика твердого тела, системы углов Эйлера

Известно, что твердое тело при вращении вокруг неподвижной точки имеет три системы свободы и его положение в пространстве однозначно определяется тремя углами. Выбор трех углов определяется исходя из специфики функционирования твердого тела и характера решаемых задач кинематики.

Известно, что один из наиболее практически удобных выборов трех углов был указан Эйлером.

В докладе рассматриваются три основных принципа правильного выбора углов Эйлера и получения 12 возможных систем углов Эйлера.

Для одной из 12 полученных систем углов Эйлера было создано приложение в пакете прикладных программ MATLAB.

Приложение позволило исследовать кинематику движения твердого тела с одной неподвижной точкой для двух случаев: правильного задания системы углов Эйлера и для случая, когда не все принципы правильного выбора углов соблюдены.

Приложение позволяет визуализировать движение твердого тела вокруг неподвижной точки. Содержит анимацию перемещения точки по сфере радиуса, соответствующего координатам точки в подвижной системе координат.

Проведенные исследования показали, что практическая ценность правильного задания углов Эйлера состоит в том, что задача кинематики твердого тела решается в полном объеме. Т. е. находятся: закон движения твердого тела, кинематические характеристики движения твердого тела, положения и кинематические характеристики движения отдельных точек твердого тела.

Литература

- [1] Колесников К.С. (ред.), Дубинин В.В. (ред.) и др. *Курс теоретической механики для вузов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, 580 с.
- [2] Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. *Курс теоретической механики*: В 2 т. Т. I. Статика и кинематика. Москва, Наука, 1982, 352 с.

Rotation of a Rigid Body around a Fixed Point. Euler Angle Systems

T.I. Orlyanskaya tamara.orlyanskaya@gmail.com

I.I. Mingalev

BMSTU, Moscow, Russia

Three basic principles for ensuring the correct choice of Euler angles are considered.

Keywords: rigid body kinematics, Euler angle systems

References

- [1] Kolesnikov K.S. (ed.), Dubinin V.V. (ed.). *Theoretical mechanics course: university textbook*. Moscow, BMSTU Press, 2017, 580 p. (In Russ.).
- [2] Loitsyansky L.G., Lurie A.I. *Course of Theoretical Mechanics: In 2 volumes. Vol. I. Statics and kinematics*. Moscow, Nauka Publ., 1982, 352 p. (In Russ.).

Применение матричных вычислений при решении задач теоретической механики методом кинетостатики

А.И. Игнатов ignatov@bmstu.ru

Ю.Н. Барышников

О.А. Ширшова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

На примере задачи по определению динамических реакций в опорах вращающегося твердого тела рассматриваются методические вопросы, связанные с применением метода кинетостатики, основанного на принципе Даламбера и используемого при решении подобного типа задач динамики механических систем. Показаны различные подходы к вычислению главного вектора и главного момента сил инерции относи-

тельно центра приведения, лежащего на оси вращающегося тела, и к вычислению центробежных моментов инерции относительно осей координат, жестко связанных с вращающимся телом. Рассмотрены преимущества использования матричных методов для вышеуказанных вычислений. Также рассмотрены матричные методы решения задачи динамической балансировки и проверки выполнения условий динамической уравновешенности вращающегося твердого тела.

Ключевые слова: теоретическая механика, матричные методы, метод кинетостатики, принцип Даламбера

Литература

- [1] Колесников К.С. (ред.), Дубинин В.В. (ред.) и др. *Курс теоретической механики для вузов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, 580 с.
- [2] Стражева И.В., Мелкумов В.С. *Векторно-матричные методы в механике полета*. Москва, Машиностроение, 1973, 260 с.

Application of Matrix Methods in Solving Tasks of Theoretical Mechanics by Using the d'Alembert Principle

A.I. Ignatov

ignatov@bmstu.ru

Yu.N. Baryshnikov

O.A. Shirshova

BMSTU, Moscow, Russia

Methodological issues related to the application of the kinetostatics method are considered. This method is based on the d'Alembert principle and is used in solving problems of the dynamics of mechanical systems. Using the example of the task of determining the reactions of the supports of a rotating rigid body, various approaches are shown to calculating the main vector and the main moment of inertia forces relative to the reference center lying on the axis of the rotating body, and to calculating the products of inertia about the coordinate axes rigidly connected to the rotating body. A solution to the problem of dynamic balancing of a rotating rigid body is also given.

Keywords: matrix methods, theoretical mechanics, d'Alembert principle

References

- [1] Kolesnikov K.S. (ed.), Dubinin V.V. (ed.). *Theoretical mechanics course: university textbook*. Moscow, BMSTU Press, 2017, 580 p. (In Russ.).
- [2] Strazheva I.V., Melkumov V.S. *Vector-matrix methods in flight mechanics*. Moscow: Mashinostroenie, 1973. 260 p. (In Russ.).

Видеоанализ демонстрационных лекционных экспериментов по физическим основам механики

К.Б. Лукин

lkb1942@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Отечественной программой анализа видеофильмов 1С «Измеритель» исследована кинематика движения двухскатного волчка, математического маятника, упругой волны, представления гармонических колебаний вращением.

Ключевые слова: демонстрации, видеоанализ, 1С «Измеритель»

Литература

- [1] Андреев А.Г., Аникеев В.Н. Лукин К.Б. Натурные лекционные эксперименты по механическим волнам, термодинамике, электростатике. *Физическое образование в вузах*, 2020, т. 26, № 4, с. 66–78.
- [2] Андреев А.Г., Аникеев В.Н. Лукин К.Б. Видеоанализ движения сферических проводящих тел в электростатическом поле. *Физическое образование в вузах*, 2022, т. 28, № 2, с. 127–138.

Video Analysis of Demonstration Lecture Experiments on the Physical Foundations of Mechanics

K.B. Lukin

lkb1942@mail.ru

BMSTU, Moscow, Russia

The domestic program for the analysis of video films 1С “Izmeritel” investigated the kinematics of the movement of a gable top, a mathematical pendulum, an elastic wave, and the representation of harmonic oscillations by rotation.

Keywords: demonstrations, video analysis, 1С “Izmeritel”

References

- [1] Andreev A.G., Anikeev V.N. Lukin K.B. Field lecture experiments on mechanical waves, thermodynamics, electrostatics. *Physical Education in Universities.*, 2020, т. 26, no. 4, pp. 66–78.
- [2] Andreev A.G., Anikeev V.N. Lukin K.B. Video analysis of the movement of spherical conducting bodies in an electrostatic field. *Physical education in universities*, 2022, vol. 28, no. 2, pp. 127–138.

О структурных формулах и структурных графах в теории механизмов

М.Д. Ковалев **mkov@rambler.ru**

МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Будет рассказано о различных современных математических формализациях понятия плоского шарнирно-рычажного механизма, и плоских конструкций с вращательными парами. Проанализированы описание строения таких конструкций различными графами и применимость структурных формул теории механизмов. Оказывается, традиционно используемый в машиноведении граф для этих классов устройств в отличие от используемого автором графа не несет полной информации об их строении.

Ключевые слова: структура механизмов, структурные графы, структурные формулы

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы Московского центра фундаментальной и прикладной математики по соглашению №075-15-2022-284.

On Structural Formulas and Structural Graphs in Mechanisms Theory

M.D. Kovalev **mkov@rambler.ru**

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

It will be told about various modern mathematical formalizations of the concept of a planar hinge-lever mechanism, and planar structures with rotational pairs. The description of the structure of such devices by various graphs and the applicability of the structural formulas of the theory of mechanisms will be analyzed. It turns out that the graph traditionally used in machine science for these classes of devices, in contrast to the graph used by the author, does not carry complete information about their structure.

Keywords: structure of mechanisms, structural graphs, structural formulas

This work was supported by the grant №075-15-2022-284.

Практические методы изучения механики материалов и высшей математики

В.Е. Хроматов KhromatovVY@mpei.ru

Л.Г. Попов

О.В. Новикова

Т.Н. Догадина

НИУ «МЭИ», Москва, Россия

Предложена методика изучения разделов курсов механики материалов, высшей математики на примерах решения задач. Излагаются биографические сведения об ученых основоположниках изучаемых дисциплин.

Ключевые слова: механика материалов, математика, примеры

Теоретические разделы курсов прикладной механики и математики излагаются кратко в виде структурно-логических схем и таблиц. Приводятся примеры решения задач.

Литература

- [1] Хроматов В.Е., Новикова О.В. Лекции по сопротивлению материалов в структурно-логических схемах. Москва, Издат. дом МЭИ, 2020.
- [2] Крупин В.Г., Павлов А.Л., Попов Л.Г. Высшая математика. Уравнения математической физики. Сборник задач с решениями. Москва, Издат. дом МЭИ, 2017.

Practical Methods for Studying the Mechanics of Materials and Higher Mathematics

V.Y. Khromatov

KhromatovVY@mpei.ru

L.G. Popov

O.V. Novikova

T.N. Dogadina

MPU RPEI, Moscow, Russia

A methodology for studying the sections of the courses of mechanics of materials, higher mathematics on examples of problem solving is proposed. Biographical information about the founders of the studied disciplines is presented.

Keywords: mechanics of materials, mathematics, examples

The theoretical sections of the courses in applied mechanics and mathematics are summarized in the form of structural logic diagrams and tables. Examples of problem solving are given.

References

- [1] Khromatov V.Y., Novikova O.V. Lectures on the strength of materials in structural logic diagrams: textbook. Moscow, MPEI Publishing House, 2020. (In Russ.).
- [2] Krupin V.G., Pavlov A.L., Popov L.G. Higher Mathematics. Equations of mathematical physics. Collection of problems with solutions: textbook. Moscow, MPEI Publishing House, 2017.

Независимый тестовый контроль по теоретической механике в УрФУ

З.В. Беляева

С.А. Берестова s.a.berestova@urfu.ru

Е.М. Романовская

Т.А. Рощева

Е.А. Савина

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Промежуточная аттестация по теоретической механике проходит на образовательной платформе Moodle с прокторингом в виде независимого тестового контроля. Коллективом авторов разработаны фонды оценочных средств с учетом разноразноуровневости образовательных программ, трудоемкости дисциплины. Уровень сложности заданий от простых на выбор правильного ответа до кейсовых задач со вложенными ответами. Многовариативность задач достигается не только широким набором данных, но и возможностью случайного выбора индивидуальных параметров каждому студенту.

Ключевые слова: промежуточная аттестация, фонды оценочных средств, образовательная платформа Moodle, прокторинг

Independent Test Control on Theoretical Mechanics at UrFU

Z.V. Belyaeva

S.A. Berestova s.a.berestova@urfu.ru

E.M. Romanovskaya

T.A. Roscheva

E.A. Savina

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Intermediate certification in theoretical mechanics takes place on the Moodle educational platform with proctoring in the form of an independent test control. A team of authors has developed funds for evaluation tools, taking into account the different levels of educational programs, the complexity of the discipline. The level of difficulty of tasks from easy to choose the right answer to case tasks with nested answers. The multi variability of tasks is

achieved not only by a wide set of data, but also by the possibility of random selection of individual parameters for each student.

Keywords: interim certification, assessment funds, Moodle educational platform, proctoring

Тестирование на кафедре теоретической механики в МГТУ им. Н.Э. Баумана

К.А. Стихно **fn2cyril@gmail.com**

М.В. Худорожко

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Обсуждается развитие программного комплекса автоматического тестирования успеваемости студентов (СТАТУС), разработанного кафедрой ФН-3 “Теоретическая механика” имени профессора Н.Е. Жуковского МГТУ им. Н.Э. Баумана. Рассмотрены количественные показатели процесса внедрения, последние модификации ПК и перспективы дальнейшего развития

Ключевые слова: тестирование, успеваемость, автоматический контроль

Литература

- [1] Стихно К.А., Шкапов П.М. Об опыте проведения дистанционного экзамена по теоретической механике. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, т. 112, № 4, с. 244–247. DOI: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2021-4-2068>
- [2] Стихно К.А., Худорожко М.Ю. Система тестирования СТАТУС. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 20226654486 от 17.08.2022.

Testing at the Department of Theoretical Mechanics at Bauman Moscow State Technical University

С.А. Stikhno **fn2cyril@gmail.com**

М.В. Khudorozhko

BMSTU, Moscow, Russia

The development of the software package for automatic testing of students’ academic performance (STATUS) developed by the Department of FS-3 “Theoretical Mechanics” named after prof. N.E. Zhukovsky of the Bauman Moscow State Technical University is discussed. Quantitative indicators of the implementation process, the latest SP modifications and prospects for further development are considered.

Keywords: testing, academic performance, automatic control

References

- [1] Stihno K.A., SHkapov P.M. Ob opyte provedeniya distancionnogo ekzamina po teoreticheskoj mekhanike. *Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii*, 2021, т. 112, № 4, pp. 244–247. DOI: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2021-4-2068>
- [2] Stihno K.A., Hudorozhko M.YU. *Sistema testirovaniya STATUS / Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 20226654486 ot 17.08.2022.*

Историко-библиографическая и педагогическая значимость работ Ф.А. Цандера по межпланетным космическим перелетам

Е.Н. Поляхова

pol@astro.spbu.ru

В.С. Королев

Санкт-Петербургский государственный университет, Россия

В 2022 году исполнилось 135 лет со дня рождения известного советского ученого и инженера, одного из выдающихся пионеров отечественной ракетно-космической науки Фридриха Артуровича Цандера (1887–1933). Мы знаем Ф.А. Цандера как одного из первых в мире ученых профессионально занимавшегося решением проблем космического полета в те годы, когда для большинства такие полеты представлялись фантастикой. Будучи глубоко убежденным в осуществлении полета, Цандер посвятил этой проблеме всю свою жизнь, а межпланетный перелет стал его заветной мечтой.

Ключевые слова: ракетостроение, астродинамика, межпланетные перелеты, солнечный парус, история космонавтики

Фридрих Артурович Цандер является одним из первых в мире ученых профессионально занимавшегося решением проблем космического полета. Он посвятил этой теме всю свою жизнь. Начало работ Ф.А. Цандера в этом направлении относится к 1907–1908 гг. Он успешный конструктор ракетной техники, автор ряда пионерских теоретических работ и увлеченный популяризатор полетов в космос.

Ф.А. Цандер — основоположник отечественной астродинамики: ученый, инженер-ракетостроитель и двигателю. Ф.А. Цандер — автор несостоявшейся (или исчезнувшей) монографии в 500 страниц. При его жизни были опубликованы только три его произведения: короткая журнальная статья «Перелеты на другие планеты» (1924 г.), журнальная статья «Реактивные двигатели» и небольшая книга «Проблема полетов при помощи реактивных аппаратов» (обе в 1932 г.).

Публикация основной работы Цандера «Перелеты на другие планеты (Теория межпланетных путешествий)» до настоящего времени не состоялась отдельной книгой, хотя он многократно докладывал планируемое содержание, но не успел ее напечатать. Соратники Цандера М.К. Тихонравов и Л.К. Корнев опубликовали ее в сборниках трудов Цандера [1–3], изданных в Москве

в 1947 и 1961 г. (только фрагменты). В Риге в 1977 г. был издан наиболее полный сборник трудов с этой статьей.

Известно, что разработка инженерного проекта [2] полета с малой тягой тонкого металлического зеркала при световом давлении после выхода из поля тяготения Земли также принадлежит именно Ф.А. Цандеру. Действительно, эта идея космоплавания впервые высказана им в 20-е года как имеющая научный и инженерный смысл. Ф.А. Цандер и К.Э. Циолковский (1857–1935) обсуждали в 1920 г. возможность того, что очень тонкий плоский лист, освещаемый солнечным светом, способен достичь высоких скоростей в космосе. Что касается вопроса о том, можно ли использовать свойство солнечных фотонов для движения вне поля тяготения Земли, то они ответили положительно. Цандер оказался первым, кто не только высказал идею, обосновав ее научную достоверность и техническую возможность реализации, но и воплотил ее в 1924 г. в расчетный инженерный проект космического корабля с отражающим зеркалом. Принцип движения в космосе под солнечным парусом базируется на эффекте светового давления. Идея применения солнечного паруса в качестве маршевого двигателя малой тяги соответствует исторически важным идеям Ф.А. Цандера о полете в космос под действием светового давления и вносит посильный вклад в разработку научного наследия ученого [4, 5]. С помощью солнечного паруса можно выполнять и гравитационные маневры около больших планет.

Многогранное научно-техническое творчество Цандера было им самим кратко сформулировано в его «Автобиографии» в 1927 г. Перечисляя свои оригинальные идеи межпланетных перелетов, он писал: «Мне принадлежит, насколько мне известно, первенство по следующим предложениям». Восьмое из девяти указанных им предложений касается гравитационных маневров: «по применению облета планет с целью увеличения скорости полета — получение даровой энергии во время полета на другие планеты и по ускорению межпланетного корабля в моменты, в которые скорость полета большая (для той же цели)». Напомним, что Цандеру принадлежит также идея оригинального электрореактивного двигателя, а также несомненное (хотя и часто оспариваемое) первенство по касательному перелету между круговыми компланарными гелиоцентрическими орбитами — знаменитый эллипс Гомана-Цандера. Что касается механики гомановских касательных межорбитальных перелетов и исторических названий этих траекторий, то мы придерживаемся устоявшегося термина «гомановские перелеты», хотя иногда применяется название «перелеты Гомана — Цандера».

Ф.А. Цандер как педагог проводил занятия в Московском Авиационном Институте, который выделился из МВТУ в 1930 г., и руководил в МАИ студенческими ракетостроительными кружками. Ф.А. Цандер — энтузиаст общественных лекций по полету в космос. Статья Цандера в определенной мере может считаться конспектом курса лекций, который он планировал читать в Военно-воздушной академии им. Жуковского.

Объединение базовой статьи ученого с комментариями ведущих специалистов по астродинамике, часто дискуссионными, а также с оглавлением той грандиозной книги всего планируемого им проекта по межпланетным перелетам явилось бы мемориальным изданием памяти нашего знаменитого соотечественника и одного из пионеров мировой космонавтики. Такая книга учитывала бы все приоритеты Ф. А. Цандера по теории межпланетных перелетов, которые были опубликованы позднее в разных изданиях. Публикация этой статьи отдельной книгой в настоящее время было бы интересно не только историкам космической науки как некий «памятник» деятельности ученого, но и специалистам по астродинамике. Дело в том, что ее публикации в разных изданиях «обросли» полезными комментариями ведущих специалистов по основам астродинамики.

Можно отметить, что «Перелеты на другие планеты» — это первый в СССР учебник «Астродинамика», который содержал задачи и формулы небесной механики применительно к космическим траекториям: основные формулы задачи двух тел, эллипс Гомана — Цандера, гравитационные маневры и многое другое. Изучение научного наследия Цандера привело к печати первого из трех выпусков «Избранных трудов пионеров космонавтики и ракетной техники» (1964, 1972, 1977 гг.). В том числе там содержались публикации трудов Цандера и его современников.

Литература

- [1] Цандер Ф.А. Проблема полета при помощи ракетных аппаратов. Сб. ст. под ред. М.К. Тихонравова. Москва, Оборонгиз, 1947, 237 с.
- [2] Цандер Ф.А. Об использовании силы давления света для полетов в межпланетном пространстве (на основе рукописей «О применении тончайших листов для полетов в межпланетном пространстве» (1924 г.) и «О давлении света на комбинированные зеркала» (1925 г.)). Цандер Ф.А. Проблема полета при помощи реактивных аппаратов. Межпланетные полеты. Сб. ст. под ред. Л.К. Корнеева. Москва, Оборонгиз, 1961, с. 361–381.
- [3] Цандер Ф.А. Проблемы межпланетных полетов (К 100-летию со дня рождения ученого). Под ред. акад. В.П. Мишина и др. Москва, Наука, 1988, 232 с.
- [4] Поляхова Е.Н. Космический полет с солнечным парусом. Под ред. В.А. Егорова. Москва, Издат. дом «Либроком» (URSS), 2018, 320 с.
- [5] Polyakhova E.N., Korolev V.S. The Solar Sail: Current State of the Problem. “Intern. Conf. on Mechanics Eighty Polyakhov’s Reading”, St. Petersburg, SPbU, Russia (AIP Conf. Proceed-ings, 2018, vol. 1959, art. 040014. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5034617>)

Historical, Bibliographic and Educational Significance of F.A. Tsander's Works on Interplanetary Spaceflights

E.N. Polyakhova

pol@astro.spbu.ru

V.S. Korolev

St. Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

The year 2022 marks the 135th anniversary of the birth of the famous Soviet scientist and engineer, one of the outstanding pioneers of the Russian rocket and space science F.A. Tsander (1887–1933). We know him as one of the first scientists in the world professionally engaged in solving the problems of spaceflight. Tsander devoted his whole life to this problem. Interplanetary transfer was his cherished dream. Among many his papers only three were published during his life, one in 1924 and two in 1932. He had written in 1924 the 100-pages paper “Transfers to other planets (Interplanetary voyages)” too that was published later: in the book “Tsander’s Selected Works” (1961 and then in 1977) and in 1964 in the book “Pioneers of Rocket Technics”. This Tsander’s paper of 1924 can be considered now as the first soviet educational Textbook on theoretical Astrodynamics. Next similar books (monografical or educational) appeared in Soviet Union about 1950s. It would be useful to publish now this Tsander’s paper separately as the memorial document of History of Science and Education.

Keywords: rocket science, astrodynamics, interplanetary flights, solar sail, history of astronautics

References

- [1] Tsander F.A. The problem of Spaceflights by the help of rocket vehicles. Collection of articles edited by M.K. Tikhonravov, in Russian. Moscow, Oborongiz Publ., 1947, 237 p. (In Russ.).
- [2] Tsander F.A., Problems of Spaceflights by Jet Propulsion Engines: Interplanetary Travels. Ed. by L.K. Korneev, in Russian. Moscow, Oborongiz Publ., 1961. (In Russ.).
- [3] Tsander F.A. Problems of interplanetary flights (To the 100th anniversary of the scientist, in Russian). Ed. acad. V. P. Mishin and others. Moscow, Nauka Publ., 1988, 232 p. (In Russ.).
- [4] Polyakhova E.N. Spaceflight with a solar sail. Moscow, URSS Publ., 2018, 320 p. (In Russ.).
- [5] Polyakhova E.N., Korolev V.S. The Solar Sail: Current State of the Problem. “Intern. Conf. on Mechanics Eight Polyakhov’s Reading”, St. Petersburg, SPbU, Russia (AIP Conf. Proceed-ings, 2018, vol. 1959, art. 040014. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5034617>)

Стефан Джевецкий: «дедушка русской авиации»

И.М. Кондратьев^{1,3}

kiimash@yandex.ru

А.Н. Богданов^{2,3}

¹ ИМАШ РАН, Москва, Россия

² НИИ механики МГУ, Россия

³ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Общепризнана роль Николая Егоровича Жуковского как «отца русской авиации». Менее известно, что у русской авиации есть и свой «дедушка». Титулом «дедушки совре-

менных самолетов» академик А.Н. Крылов [1] наградила Стефана Дзевецкого, талантливого изобретателя, инженера и предпринимателя. Несмотря на то что значительную часть жизни Дзевецкий провел во Франции, он основательно вошел в историю отечественной науки и техники, прежде всего своими изобретениями для морского флота. В конце XIX века он увлекся авиацией, занимался теоретическими и экспериментальными исследованиями в этой области, писал научные статьи, построил завод по производству пропеллеров собственной конструкции [2], а в 1912 г. даже сам сконструировал аэроплан, который продемонстрировал на Парижской выставке.

Ключевые слова: Стефан Дзевецкий, Николай Егорович Жуковский, авиация, аэроплан, теория винта, подводная лодка

Литература

- [1] Крылов А.Н. Мои воспоминания. Москва, Изд-во АН СССР, 1963, с. 343–384.
- [2] Дузь П.Д. История воздухоплавания и авиации в России: период до 1914 г. Москва, Наука, 1995, 496 с.

Stefan Drzewiecki: “The Grandfather of Russian Aviation”

I.M. Kondratyev^{1,3}

kiimash@yandex.ru

A.N. Bogdanov^{2,3}

¹ IMASH RAS, Moscow, Russia

² Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³ BMSTU, Moscow, Russia

The role of Nikolai Yegorovich Zhukovsky as the “father of Russian aviation” is generally recognized. Less well known is that Russian aviation has its own “grandfather”. Academician A.N. Krylov [1] awarded the title of “grandfather of modern aircraft” to Stefan Drzewiecki, a talented inventor, engineer and entrepreneur. Despite the fact that Drzewiecki spent a significant part of his life in France, he thoroughly entered the history of Russian science and technology, primarily with his inventions for the navy. At the end of the XIX century, he became interested in aviation, engaged in theoretical and experimental research in this field, wrote scientific articles, built a factory for the production of propellers of his own design [2], and in 1912 he even designed an airplane himself, which he demonstrated at the Paris Exhibition.

Keywords: Stefan Drzewiecki, Nikolai Yegorovich Zhukovsky, aviation, airplane, propeller theory, submarine

References

- [1] Krylov A.N. *Moi vospominaniya [My memoirs]* Moscow, USSR Acad. of Science publ., 1963. 380 p. (In Russ.).
- [2] Duz P.D. *Istoriya vozdukhoplavaniya i aviatsii v Rossii: Period do 1914 [A history of aeronautics and aviation in Russia: Period before 1914]* Moscow, Nauka publ., 1995. 496 p. (In Russ.).

Н.Д. Моисеев и идеи технической устойчивости (к 120-летию со дня рождения)

В.Н. Чиненова

v.chinenova@yandex.ru

МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Рассматривается концепция Н.Д. Моисеева развития неляпуновских теорий устойчивости, т. е. теорий устойчивости, построенных на конечных, а не бесконечно малых, как у Ляпунова, возмущениях, учитывающих наличие возмущающих сил или считающих соответствующий промежуток времени конечным в противоположность ляпуновскому неограниченному интервалу времени.

Ключевые слова: техническая устойчивость, теория устойчивости, Н.Д. Моисеев, А.Н. Ляпунов

Известный русский ученый, профессор МГУ им. М.В. Ломоносова Николай Дмитриевич Моисеев (1902–1950) был выдающимся ученым и многогранным исследователем, проводившим их в различных научных направлениях. Остановимся лишь на некоторых его работах, которые обогатили теорию Ляпунова и дали исследователям-прикладникам конструктивные средства для решения конкретных проблем, связанных с динамикой полета авиационной техники и с конструкциями промышленных специальных изделий различного назначения.

Как справедливо замечает Е.А. Гребенников в книге о Моисееве, «Вместе со своими коллегами — профессорами Московского университета и Военно-воздушной академии им. Н.Е. Жуковского Г.Н. Дубошиным и Н.Г. Четаевым он внес существенный вклад в развитие теории устойчивости» [1, с. 57].

Понятие устойчивости в смысле Ляпунова было построено на трех основных концепциях:

1) бесконечно малых отклонений, 2) отсутствия возмущающих сил и 3) бесконечности промежутка времени.

Сопоставление теории Ляпунова с новой техникой повлекло за собой пересмотр самого понятия устойчивости в смысле Ляпунова, что привело к необходимости разработки новых вариантов понятия устойчивости. Среди этих новых вариантов понятия устойчивости, порожденных прогрессом техники и физики, важную роль играло понятие так называемой «технической устойчивости».

В обзоре [2], опубликованном в «Записках семинара по теории устойчивости движения» (который работал при Военно-воздушной академии им. Н.Е. Жуковского), Н.Д. Моисеев дает анализ развития неляпуновских теорий устойчивости, т. е. теорий устойчивости, построенных на конечных, а не бесконечно малых, как у Ляпунова, возмущениях, учитывающих наличие возмущающих сил или считающих промежуток времени конечным в противоположность ляпуновскому неограниченному интервалу времени.

Эти соображения послужили источником разработок Н.Д. Моисеева, относящихся к так называемой «технической устойчивости».

Появление этого понятия связано непосредственно с запросами практики военного времени, и оно оказалось чрезвычайно полезным для оценки «живучести» и прочности технических агрегатов и изделий, прежде всего, военного назначения. С одной стороны, ясно, что ни одно промышленное изделие не может существовать вечно (в теории Ляпунова свойство устойчивости всегда рассматривается на бесконечном промежутке времени), а с другой стороны, на практике весьма важным может оказаться близость (с течением конечного интервала времени) не всех координат (или параметров), описывающих конкретную техническую модель или режим ее эксплуатации, а лишь части из них. Отсюда возникло понятие «устойчивость по части переменных», которая, очевидно, не является устойчивостью в смысле Ляпунова. Это обстоятельство побудило Н.Д. Моисеева дать определение и приспособить понятие технической устойчивости, прежде всего, к исследованию устойчивости авиационных и артиллерийских технических систем.

Различным аспектам этого нового понятия «технической устойчивости» был посвящен большой цикл работ Н.Д. Моисеева.

Литература

- [1] Гребенников Е.А., Тюлина И.А. Николай Дмитриевич Моисеев 1902–1955. Москва, Наука, 2007.
- [2] Моисеев Н.Д. Обзор истории развития понятия и теории устойчивости в смысле Ляпунова. Записки семинара по теории устойчивости движения. Москва, ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1946, вып. 1, с. 5–105.

N.D. Moiseev and the Ideas of Technical Stability

V.N. Chinenova **v.chinenova@yandex.ru**

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The concept of N.D. Moiseev of the development of non-Lyapunov stability theories, i.e. theories of stability built on finite, and not infinitely small, as in Lyapunov, perturbations, taking into account the presence of perturbing forces or considering the corresponding time interval to be finite, in contrast to Lyapunov's unlimited time interval.

Keywords: technical stability; stability theory; N.D. Moiseev; A.N. Lyapunov

References

- Moiseev N.D. *Review of the history of the development of the concept and theory of stability in the sense of Lyapunov. Notes of the seminar on the theory of stability of motion.* Moscow, VVIA im. N.E. Zhukovsky, 1946, iss. 1, pp. 5–105.

Год 175-летнего юбилея Николая Егоровича Жуковского

П.М. Шкапов

spm@bmstu.ru

Г.А. Базанчук

Е.Б. Гартиг

С.В. Кураков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В докладе дан обзор наиболее значимых событий, состоявшихся в год 175-летнего юбилея Николая Егоровича Жуковского, в которых участвовали сотрудники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Отмечено большое значение просветительской деятельности среди молодежи, направленной на воспитание патриотизма и национальной гордости россиян за выдающиеся достижения отечественных ученых, инженеров и конструкторов.

Ключевые слова: Жуковский Николай Егорович; 175-летний юбилей; МГТУ им. Н.Э. Баумана; молодежь; просветительская деятельность

Великий русский ученый Николай Егорович Жуковский родился 17 января 1847 года в сельце Орехово, Собинского района Владимирской области, где в настоящее время существует «Мемориальный дом-музей усадьба Н.Е. Жуковского». Во всем мире признаны его выдающиеся достижения в теоретической и прикладной аэро- и гидродинамике, теории воздухоплавания, аналитической механике, теоретической механике, прикладной механике, прикладной математике, астрономии и других областях науки и техники. При этом высокую оценку получили не только научные работы, но также его огромная роль в соединении новых научных и экспериментальных результатов с практическим их применением в технике, создании научных коллективов и учреждений, способных решать самые сложные задачи на передовых направлениях науки.

В преддверии юбилея, в декабре 2021 г. в МГТУ им. Н.Э. Баумана прошла Международная научная конференция «Фундаментальные и прикладные задачи механики (FARM–2021)», посвященная памяти нашего великого соотечественника. В работе конференции участвовало более трехсот ученых, выступивших со ста шестьюдесятью докладами на 8 секциях форума [1].

Деятельное участие в организации и проведении конференции принимали преподаватели и сотрудники кафедры «Теоретическая механика», созданной Н.Е. Жуковским в Императорском Высшем техническом училище в 1878 г. [2]. Кафедра носит имя профессора Н.Е. Жуковского и бережно сохраняет память о своем основателе, который проработал на кафедре 43 года — с 1878 по 1921 г.

Утром 17 января 2022 г. делегации МГТУ им. Н.Э. Баумана и кафедры теоретической механики возложили цветы к памятнику Н.Е. Жуковского на кладбище Донского монастыря.



В тот же день состоялось собрание преподавателей, сотрудников и студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана у памятника Н.Е. Жуковского в галерее Основателей научных школ университета. В мероприятии участвовали Михаил Валерьевич Гордин — ректор и Анатолий Александрович Александров — президент Университета.



В «Мемориальном доме-музее усадьбе Н.Е. Жуковского» в с. Орехово состоялось гашение конвертов с марками, специально выпущенными Почтой России к юбилею ученого.



Заведующая музеем Майя Константиновна Ширканова и главная хранительница Елена Анатольевна Ширканова разработали и реализовали несколько значимых программ, связанных с памятью Н.Е. Жуковского в его юбилейный год [3]. Этому был посвящен доклад канд. ист. наук Е.А. Ширкановой на пленарном заседании FARM–2022.



18 октября 2022 г. большая делегация МГТУ им. Н.Э. Баумана посетила музей в с. Орехово, ознакомилась с экспозицией и передала сувениры и подарки. Были намечены пути развития взаимодействия на основе широкого привлечения молодежи и студентов к изучению наследия великого ученого [4].



Музей МГТУ им. Н.Э. Баумана представил обновленную экспозицию, посвященную Н.Е. Жуковскому — основателю многих научных школ МВТУ и одному из основоположников «русского метода обучения ремеслам» [5].

В апреле 2022 г. в МГТУ им. Н.Э. Баумана прошла конференция «Студенческая научная весна», посвященная в этом году 175-летию Н.Е. Жуковского. Заседание секции теоретической механики традиционно прошло в Музее Н.Е. Жуковского на улице Радио в форме выездного заседания кафедры «Теоретическая механика» имени профессора Н.Е. Жуковского.

После экскурсии по залам музея участники конференции заслушали доклады студентов и аспирантов.





В ноябре 2022 состоялась выставка «Политехника», также посвященная юбилею Н.Е. Жуковского. От кафедры ФНЗ «Теоретическая механика» на ней были представлены два проекта, научным руководителем которых является д-р техн. наук, профессор кафедры А.Ю. Карпачев.

Большая роль «отца русской авиации» в подготовке дороги от авиации в космос была отмечена на состоявшихся в январе 2022 г. Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С. П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства [6].

Значительная роль Н.Е. Жуковского в развитии авиации, астрономии, космонавтики, была отмечена в докладах на Чтениях, посвященных 165-летию со дня рождения Константина Эдуардовича Циолковского, состоявшихся в сентябре 2022 г. в Калуге [7]. Этому выдающемуся ученому-самоучке еще на первых шагах его научной деятельности Николай Егорович оказал внимание и поддержку.

И наконец, в завершении юбилейного года Н.Е. Жуковского состоялась наша очередная Международная научная конференция FARM–2022, в заключение которой мы подводим итоги и намечаем планы на дальнейшую работу по развитию научного и научно-методического развития механики и всех направлений ее приложений в науке и технике. Именно к этому нас вдохновляет пример наших великих ученых, среди которых имя Николая Егоровича Жуковского является подлинным символом России [1].



Все вышеперечисленные мероприятия, посвященные памяти Николая Егоровича Жуковского, имели, в том числе, цель усилить просветительскую деятельность среди молодежи, показать на примере нашего великого соотечественника значительную роль ученых и инженеров России в мировой науке и техническом прогрессе [8].

Литература

- [1] Шкапов П.М. Николай Егорович Жуковский — символ России. К 175-летию со дня рождения. Междунар. науч. конф. «Фундаментальные и прикладные задачи механики»: матер. конф. В 2 ч. Ч. 1 // Инженерный журнал: наука и инновации, 2022, вып. 5, с. 6-9. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-5-2182>
- [2] Шкапов П.М. О создании кафедры теоретической механики и одноименной научно-педагогической школы в Императорском Московском Техническом Училище (к 170-летию со дня рождения Н.Е. Жуковского). Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, № 12, с. 366–377.
- [3] Сайт «Мемориального дома-музея усадьбы Н.Е. Жуковского» в с. Орехово Собинского района Владимирской области. URL: <https://www.zhukovskyyne.ru/>
- [4] Ссылка на видео посещения с. Орехово. URL: <http://fn.bmstu.ru/faculty-basic-sciences/news-and-events-fs/item/1145-zhukovsky-manor-in-orekhovo-ru> (обращение 27.12.2022).
- [5] Базанчук Г.А., Гартиг Е.Б., Кураков С.В., Шкапов П.М. Процесс обучения ремеслам в МРУЗ в середине XIX века как зарождение и начало формирования «Русского метода подготовки инженеров». Междунар. науч. конф. «Фундаментальные и прикладные задачи механики»: матер. конф. В 2 ч. Ч. 2. Инженерный журнал: наука и инновации, 2022, вып. 6, с. 6-9. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-5-2182>
- [6] Шкапов П.М., Базанчук Г.А. Жуковский — имя символ. XLVI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся

- отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства: сб. тез. в 4 т. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022, т. 1, с. 37–39. <https://bmstu.press/catalog/item/7554/reader/>
- [7] Базанчук Г.А., Гартиг Е.Б., Кураков С.Н., Шкапов П.М., Штрихи биографии Н.Е. Жуковского (по материалам личного дела ученого в Императорском московском техническом училище). Матер. 57-х науч. чт., посв. разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Калуга, 2022, ч. 1, с. 167–169. DOI: https://readings.gmik.ru/abstracts_2022_part_1.pdf
- [8] Шкапов П.М. Просветительская деятельность как неотъемлемая часть преподавательского процесса. Междунар. науч. конф. «Фундаментальные и прикладные задачи механики». *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 2, № 2 (98), с. 262–264. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-2-1960> (In Russ.).

The Year of the 175th Anniversary of Nikolai Egorovich Zhukovsky

P.M. Shkapov

spm@bmstu.ru

G.A. Bazanchuk

E.B. Gartig

S.V. Kurakov

BMSTU, Moscow, Russia

The report provides an overview of the most significant events that took place in the year of the 175th anniversary of Nikolai Egorovich Zhukovsky, in which employees of the Bauman Moscow State Technical University participated. The importance of educational activities among young people aimed at fostering patriotism and national pride of Russians for the outstanding achievements of Russian scientists, engineers and designers was noted.

Keywords: Zhukovsky Nikolay Egorovich, 175-year anniversary, Bauman Moscow State Technical University, youth, educational activities

References

- [1] Shkapov P.M. Nikolay Yegorovich Zhukovskiy — simvol Rossii. K 175-letiyu so dnya rozhdeniya. Mezhdunar. науч. конф. «Fundamental’nyye i prikladnyye zadachi mekhaniki»: mater. конф. V 2 ch. CH. 1 // *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*, 2022, vyp. 5, s. 6–9. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-5-2182> (In Russ.).
- [2] Shkapov P.M. O sozdanii kafedry teoreticheskoy mekhaniki i odnoimennoy nauchno-pedagogicheskoy shkoly v Imperatorskom Moskovskom Tekhnicheskom Uchilishche (k 170-letiyu so dnya rozhdeniya N.Ye. Zhukovskogo). *Nauka i obrazovaniye: nauchnoye izdaniye MGTU im. N.E. Baumana*, 2016, № 12, s. 366–377. (In Russ.).
- [3] Sayt «Memorial’nogo doma-muzeya usad’by N.Ye. Zhukovskogo» v s. Orekhovo Sobinskogo rayona Vladimirskoy oblasti. URL: <https://www.zhukovskoye.ru/> (In Russ.).
- [4] Ssylka na video poseshcheniya s. Orekhovo. URL: <http://fn.bmstu.ru/faculty-basic-sciences/news-and-events-fs/item/1145-zhukovsky-manor-in-orekhovo-ru> (obrashcheniye 27.12.2022). (In Russ.).
- [5] Bazanchuk G.A., Gartig Ye.B., Kurakov C.V., Shkapov P.M. Protsess obucheniya remeslam v MRUZ v seredine XIX veka kak zarozhdeniye i nachalo formirovaniya “Russkogo metoda podgotovki inzhenerov”. Mezhdunar. науч. конф. “Fundamental’nyye i prikladnyye zadachi mekhaniki”: mater. конф. V 2 ch. ch. 2. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*, 2022, vol. 6, pp. 6–9. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-5-2182> (In Russ.).

- [6] Shkapov P.M., Bazanchuk G.A. Zhukovskiy — imya simvol. XLVI Akademicheskiye chteniya po kosmonavtike, posvyashchennyye pamyati akademika S.P. Korolova i drugikh vydayushchikhsya ote- chestvennykh uchenykh — pionerov osvoyeniya kosmicheskogo prostranstva: sb. tez. v 4 t. Moskva, BSTU Press, 2022, vol. 1, pp. 37–39. URL: <https://bmstu.press/catalog/item/7554/reader/> (In Russ.).
- [7] Bazanchuk G.A., Gartig Ye.B., Kurakov S.N., Shkapov P.M., Shtrikhi biografii N.Ye. Zhukovskogo (po materialam lichnogo dela uchenogo v Imperatorskom moskovskom tekhnicheskome uchilishche). Mater. 57-kh nauch. cht., posv. razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo. Kaluga, 2022, ch. 1, pp. 167–169. DOI: https://readings.gmik.ru/abstracts_2022_part_1.pdf (In Russ.).
- [8] Shkapov P.M. Prosvetitel'skaya deyatel'nost' kak neot'yemlemaya chast' prepodavatel'skogo protsessa. Mezhdunar. nauch. konf. "Fundamental'nyye i prikladnyye zadachi mekhani-ki". Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii, 2020, vol. 2, no. 2 (98), pp. 262–264. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-2-1960> (In Russ.).

Содержание

Организаторы конференции	5
Международный организационный комитет	5
Академический программный комитет	6
Секции конференции	7
Сайт конференции	7
Секция 3. Аэро- и гидродинамика	8
<i>Дмитренко А.В., Колосова М.А., Колпаков М.И., Закутнов С.М., Бойченко Д.А.</i> Оценка критического числа Рейнольдса при обтекании цилиндра	8
<i>Dmitrenko A.V., Kolosova M.A., Kolpakov M.I., Zakutnov S.M., Boychenko D.A.</i> Estimate of the Critical Reynolds Number in a Flow around a Cylinder	9
<i>Калугин В.Т., Луценко А.Ю., Назарова Д.К., Слободянюк Д.М., Михайлов М.В.</i> Особенности обтекания крышки люка парашютного контейнера при ее отделении от возвращаемого аппарата	9
<i>Kalugin V.T., Lutsenko A.Yu., Nazarova D.K., Slobodyanyuk D.M., Mikhailov M.V.</i> The Flow Features of the Parachute Container Hatch Cover during its Separation from the Reentry Vehicle	10
<i>Назарова Д.К., Калугина М.Д., Кирдяев Н.И., Прокопов Е.Ю., Семенов Н.С.</i> Аэродинамические характеристики перфорированных элементов конструкции летательных аппаратов	11
<i>Nazarova D.K., Kalugina M.D., Kirnyaev N.I., Prokopov E.Yu., Semenov N.S.</i> Aerodynamic Characteristics of Perforated Aircraft Structural Elements in Subsonic Flow	15
<i>Кочуров Д.С.</i> Коэффициент восстановления температуры при сверхзвуковом течении газовых смесей в малых каналах	15
<i>Жидков Д.А., Жидков М.А.</i> Ударно-волновая гипотеза вихревого эффекта Ранка — Хилша	20
<i>Zhidkov D.A., Zhidkov M.A.</i> Shock-Wave Hypothesis of the Ranque–Hilsch Vortex Effect	21
<i>Леонтьев Н.Е., Таурбаева К.</i> Решения с бегущими волнами уравнений объемной фильтрации суспензии	21

<i>Leontiev N.E., Taurbaeva K.</i> Travelling Wave Solutions to Deep Bed Filtration Equations	22
<i>Леонтьев Н.Е.</i> Анизотропная модель объемной фильтрации суспензии в пористой среде	22
<i>Leontiev N.E.</i> An Anisotropic Deep Bed Filtration Model	23
<i>Якимов А.Ю.</i> Уравнение волнового бора	23
<i>Yakimov A.Yu.</i> The Wave Bore Equation	24
<i>Здитовец А.Г., Киселев Н.А., Виноградов Ю.А., Попович С.С.</i> Экспериментальное исследование влияния на эффект Эккерта — Вайса режимов обтекания пары круговых цилиндров	24
<i>Zditovets A.G., Kiselev N.A., Vinogradov Yu.A., Popovich S.S.</i> Experimental Study of the Eckert–Weise Effect under the Flow Regimes around a Pair of Circular Cylinders	25
<i>Симоненко М.М., Гувернюк С.В., Зубков А.Ф.</i> Неоднозначные режимы сверхзвукового обтекания осесимметричных каверн под углами атаки	26
<i>Simonenko M.M., Guvernuyuk S.V., Zubkov A.F.</i> Ambiguous Modes of Supersonic Flow around Axisymmetric Cavities at Angles of Attack	29
<i>Калиниченко В.А.</i> Эффект вязкой коротковолновой отсечки для стоячих поверхностных гравитационных волн	30
<i>Kalinichenko V.A.</i> Viscous Shortwave Cutoff Effect for Standing Surface Gravity Waves	30
<i>Булатов В.В.</i> Волновая динамика стратифицированных сред с фоновыми сдвиговыми течениями	31
<i>Bulatov V.V.</i> Wave Dynamics of Stratified Medium with Shear Flows	33
<i>Булатов В.В., Пономарев А.Н.</i> О возможности улучшения качества изображения при дистанционном зондировании водных сред	35
<i>Bulatov V.V., Ponomarev A.N.</i> On the Possibility of Improving Image Quality in Remote Sensing of Aquatic Environments	38
<i>Рожков А.Н., Федюшкин А.И.</i> Динамика и разрушение капли воды при ударе о твердое препятствие	40
<i>Rozhkov A.N., Fedyushkin A.I.</i> Dynamics and Breakup of a Water Drop upon Impact with a Solid Obstacle	44
<i>Прокофьев В.В., Очеретяный С.А.</i> Влияние параметров генератора импульсных струй на эффективность его работы	45
<i>Prokofiev V.V., Ocheretyaniy S.A.</i> Influence of the Parameters of the Pulse Jet Generator on the Efficiency of Its Operation	46

<i>Шкапов П.М., Благовецешенский И.Г.</i> Использование релаксационных автоколебаний течений жидкости с ограниченной искусственной газовой каверной в вибрационных технологиях	47
<i>Shkapov P.M., Blagoveshchensky I.G.</i> The Use of Relaxation Self-Oscillations of Fluid Flows with a Limited Artificial Gas Cavity in Vibration Technologies	48
<i>Попович С.С., Здитовец А.Г., Киселев Н.А., Виноградов Ю.А., Маластовский Н.С.</i> Отработка панорамного теневого метода диагностики дисперсности распыла форсунки	48
<i>Popovich S.S., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Vinogradov Yu.A., Malastovskiy N.S.</i> Development of a Panoramic Shadow Method for Diagnosing the Dispersion of the Nozzle Spray	49
<i>Киселев Н.А., Маластовский Н.С., Виноградов Ю.А.</i> Экспериментальное исследование параметров теплообмена в малоразмерном сопле в условиях ламинаризации	49
<i>Kiselev N.A., Malastovskiy N.S., Vinogradov Yu.A.</i> Experimental Study of Heat Transfer Parameters in a Small-Sized Combination under Laminarization Conditions	50
<i>Казина Л.З., Мирзаянов А.А., Ниценко В.А., Питюк Ю.А., Ломухин А.Ю.</i> Численное моделирование процесса фильтрации газа и воды в микромоделях пористой среды	50
<i>Kazina L.Z., Mirzayanov A.A., Nitsenko V.A., Pityuk Yu.A., Lomukhin A.Yu.</i> Numerical Modeling of Gas and Water Filtration Process in Micromodels of Porous Medium	51
<i>Кузьмин А.Г.</i> Колебательные режимы трансзвукового течения в изогнутом канале	52
<i>Kuzmin A.G.</i> Oscillatory Regimes of Transonic Flow in a Bent Channel	53
<i>Бабарыкин К.В., Кузьмин А.Г.</i> Взаимодействие местных сверхзвуковых зон при трансзвуковом обтекании осесимметричного тела	53
<i>Babarykin K.V., Kuzmin A.G.</i> Interaction of Local Supersonic Regions in Transonic Flow over an Axisymmetric Body	54
<i>Богданов А.Н.</i> О методе расчета эволюции ударной волны в неоднородной среде. Эволюция идеи	54
<i>Каменских А.А., Носов Ю.О.</i> Описание вязкоупругого поведения смазки на основе численной процедуры идентификации	56
<i>Kamenskikh A.A., Nosov Yu.O.</i> Description of the Lubricant Viscoelastic Behavior Based on A Numerical Identification Procedure	57
<i>Сергеев М.Н.</i> Экспериментальное исследование обтекания цилиндра системой закрученных струй	57

<i>Sergeev M.N.</i> Experimental Study of the Flow around a Cylinder by a System of Swirling jets	58
<i>Берестова С.А., Просвирыков Е.Ю.</i> Исследование крупномасштабных вертикально завихренных течений на основе точных решений уравнений Навье — Стокса	58
<i>Berestova S.A., Prosviryakov E.Yu.</i> Investigation of Large-Scale Vertically Swirling Flows Based on Exact Solutions of the Navier — Stokes Equations ..	59
<i>Байдюлов В.Г., Пью Ко Ко.</i> Частотные характеристики резонатора для трубы переменного радиуса	59
<i>Baydulov V.G., Pyyo Ko Ko.</i> Frequency Characteristics of the Resonator for a Pipe of Variable Radius	60
<i>Темнов А.Н., Чжан Юе, Ян Наинг У.</i> О движениях твердых тел, имеющих полости с неоднородной жидкостью	60
<i>Temnov A.N., Zhang Yu, Yan Naing O.</i> About the Motions of Solid Bodies Having Cavities with an Inhomogeneous Fluid	61
<i>Вин Ко Ко, Темнов А.Н.</i> Нелинейные колебания двух слоев жидкостей в цилиндрических емкостях	62
<i>Win Ko Ko, Temnov A.N.</i> Nonlinear Oscillations of Two Layers of Liquids in Cylindrical Containers	63
<i>Темнов А.Н., Ян Наинг.</i> Устойчивость вращения твердого тела с неоднородной жидкостью вокруг вертикальной оси динамической симметрии	63
<i>Temnov A.N., Yan Naing Oo.</i> Stability of Rotation of a Solid Body with an Inhomogeneous Fluid around the Vertical Axis of Dynamic Symmetry	64
<i>Маркина Ю.А., Темнов А.Н.</i> Параметрические колебания криогенной жидкости	65
<i>Markina J.A., Temnov A.N.</i> Parametric Fluctuations of Cryogenic Liquid	65
<i>Юй Чжаокай, Темнов А.Н., Шкапов П.М.</i> Оценка коэффициента демпфирования колебаний жидкости вблизи линии трехфазного контакта	66
<i>Yu Zhaokai, Temnov A.N., Shkapov P.M.</i> Estimation of the Damping Coefficient of Fluid Oscillations on the Three-Phase Contact Line	69
<i>Дьяченко М.И., Темнов А.Н.</i> Динамика шнекового насоса системы перераспределения	70
<i>Dyachenko M.I., Temnov A.N.</i> The Dynamics of the Screw Pump of the Redistribution System	71

Секция 4. Прикладная механика	72
<i>Сладкова Л.А., Симачев В.А., Новинский Д.О.</i> Устройство против буксования колес	72
<i>Sladkova L.A., Simachev V.A., Novinsky D.O.</i> Device against Wheel Slipping	73
<i>Сафаров И.И., Тешаев М.Х., Болтаев З.И., Каримов И.М.</i> Гармонические волны в вязкоупругом цилиндре секторного поперечного сечения	73
<i>Safarov I.I., Tashaev M.Kh., Boltaev Z.I., Karimov I.M.</i> Harmonic Waves in a Viscoelastic Cylinder of Sector Cross-Section	74
<i>Скворцов О.Б.</i> Измерение параметров механических ударных процессов при исследовании снижения усталостной прочности	74
<i>Skvortsov O.B.</i> Measurement of Parameters of Mechanical Impact Processes in the Study of Fatigue Strength Reduction	79
<i>Скворцов О.Б., Сташенко В.И.</i> Продольно-поперечные деформации проводников при электроимпульсном воздействии	79
<i>Skvortsov O.B., Stashenko V.I.</i> Longitudinal-Transverse Deformations of Conductors under Electropulse action	84
<i>Сташенко В.И., Скворцов О.Б.</i> Вибрация металлов при их обработке давлением с использованием электропластического эффекта	84
<i>Stashenko V.I., Skvortsov O.B.</i> Vibration of Metals During their Pressure Treatment Using the Electroplastic Effect	88
<i>Казаков К.Е.</i> Контактное взаимодействие трубы с покрытием и системы втулок в случае сложных форм соприкасающихся поверхностей	89
<i>Kazakov K.E.</i> Contact of Coated Pipe and Bushing Systems in the Case of Complex Shapes of Touching Surfaces	89
<i>Казаков К.Е., Курдина С.П.</i> Об аналитических решениях краевых задач для радиально неоднородных кольцевых цилиндров	90
<i>Kazakov K.E., Kurdina S.P.</i> On Analytical Solutions of Boundary Value Problems for Radially Inhomogeneous Annular Cylinders	90
<i>Паршин Д.А.</i> Механический анализ медленного процесса аддитивного производства однонаправленного композита на цилиндрической оправке	91
<i>Parshin D.A.</i> Mechanical Analysis of the Slow Process of Additive Manufacturing an Unidirectional Composite on a Cylindrical Mandrel	92
<i>Перельмутер М.Н.</i> Влияние резорбции костной ткани на напряженное состояние вблизи дентальных имплантатов	92
<i>Perelmuter M.N.</i> Bone Resorption Effect on Stress State near Dental Implants	97

<i>Сизо А.А., Литвинов А.Е.</i> Расширение эксплуатационных возможностей ленточных пил металлорежущих станков	98
<i>Sizo A.A., Litvinov A.E.</i> Expanding the Operational Capabilities of Band Saws of Metal-Cutting Machines	108
<i>Славкина Е.В., Астахов М.В.</i> Расчет на прочность многослойной композитной прямоугольной пластинки с дискретными опорами	109
<i>Slavkina E.V., Astahov M.V.</i> Strength Analysis of a Multilayer Composite Rectangular Plate with Discrete Supports	109
<i>Полякова Т.В., Гаврюшин С.С.</i> Моделирование установки временных внутрикостных имплантатов при помощи нативной модели нижней челюсти	110
<i>Poliakova T.V., Gavriushin S.S.</i> Simulation the Installation of Transitional Intraosseous Implants Using a Native Model of the Lower Jaw	115
<i>Чжан Цинхуэй.</i> Моделирование метода торк-аут для измерения адгезивной прочности на основе модели связной зоны	115
<i>Zhang Qinghui.</i> Simulation of the Torque-out Method for Measuring Adhesive Strength Based on the Cohesive Zone Model	116
<i>Карпачев А.Ю., Берчун Ю.В., Рабкин Д.Л., Гамарник А.А.</i> Расчет амплитудных значений эквивалентных напряжений во вращающемся дисковом режущем инструменте	116
<i>Karpachev A.Yu., Berchun Yu.V., Rabkin D.L., Gamarnik A.A.</i> Compute of the Equivalent Stresses Amplitude in a Rotating Disk Cutting Tool	117
<i>Михин М.Н., Белова Т.Б., Белова О.В.</i> Заращение вязкоупругой стареющей пластины, ослабленной треугольным отверстием	117
<i>Mikhin M.N., Belova T.B., Belova O.V.</i> Overgrowth of Viscoelastic Aging Plate Weakened by Triangular Hole	121
<i>Михин М.Н., Белова Т.Б., Белова О.В.</i> Применение теории зарастающих отверстий к теории зарастающих трещин	122
<i>Mikhin M.N., Belova T.B., Belova O.V.</i> Application of the Theory for Overgrowing Holes to the Theory of Overgrowing Cracks	122
<i>Дюков А.В., Гущина Т.А., Федоров С.В.</i> Проникание в грунтово-скальные преграды ударников с конической и оживальной головной частью	123
<i>Dyukov A.V., Gushchina T.A., Fedorov S.V.</i> Penetration into Soil-Rock Targets of Projectiles with Conical and Ogival Head Part	127
<i>Старшикова А.С., Федоров С.В., Люшин С.А.</i> Ускорение пластин при ударно-волновом нагружении	128
<i>Starshikova A.S., Fedorov S.V., Lyushnin S.A.</i> Plate Acceleration under Shock-Wave Loading	132

<i>Вацлавский А.Б.</i> Проектирование отечественной путеизмерительной тележки	133
<i>Vatlavskiy A.B.</i> Designing a Domestic track Measuring Trolley	133
<i>Дуйшеналиев Т.Б., Меркурьев И.В., Исмагилов И.Р.</i> Уравнение огибающей линии предельных кругов напряжений хрупких материалов	134
<i>Duishenaliev T.B., Merkuryev I.V., Ismagilov I.R.</i> The Equation of the Envelope line of the Limiting Circles of Stresses of Brittle Materials	138
<i>Панькова А.П., Каменских А.А.</i> Численное исследование влияния комплексных нагрузок от мостового пролета на работу опорной части	138
<i>Pankova A.P., Kamenskih A.A.</i> Numerical Study of the Complex Loads Influence from the Bridge Span on the Bearing Operation	139
<i>Богданович В.И., Ващуков Ю.А., Гиорбелидзе М.Г., Коваленко С.В.</i> Исследование процесса получения отверстий в полимерных композиционных материалах сверлами с подрезающими кромками с вакуумными ионно-плазменными износостойкими покрытиями	139
<i>Bogdanovich V.I., Vashukov Yu.A., Giorbelidze M.G., Kovalenko S.V.</i> Investigation of Obtaining Holes Process in Polymer Composite Materials by Drills with Cutting Edges with Vacuum Ion-Plasma Wear-Resistant Coatings	144
<i>Сафаров И.И., Тешаев М.Х., Рахмонов Б.С.</i> Воздействие сейсмозрывных волн в кусочно-однородном цилиндрическом теле	145
<i>Safarov I.I., Tashaev M.Kh., B.S. Rakhmonov</i> The Impact of Seismic and Explosive Waves in a Piecewise Homogeneous Cylindrical Body	146
<i>Мовсисян М.Н., Приходько А.А.</i> Кинематический анализ планетарной передачи с овальными зубчатыми колесами	146
<i>Movsisyan M.N., Prikhodko A.A.</i> Kinematic Analysis of a Planetary Mechanism with Oval Gears	150
<i>Сафаров И.И., Тешаев М.Х., Ишмаматов М.Р., Кулмуратов Н.Р.</i> Собственные колебания вязкоупругой ребристой усеченной конической оболочки	151
<i>Safarov I.I., Tashaev M.Kh., Ishmatov M.R., Kulmuratov N.R.</i> Proper Vibrations of a Viscoelastic Ribbed Truncated Conical Shell	152
<i>Азизов Э.Ю., Приходько А.А.</i> Построение центроиды некруглого зубчатого колеса с внутренними зубьями в паре с овальной шестерней	152
<i>Azizov E.Yu., Prikhodko A.A.</i> Construction of the Centroid of a Non-Circular Gear with Internal Teeth Paired with an Oval Gear	156

<i>Хусаинов С.Б., Хусаинов Р.Б.</i> Колебания систем, состоящих из подземных трубопроводов и колодцев, при различном действии сейсмической волны	157
<i>Khusainov B.S., Khusainov B.B.</i> Vibrations of Systems Consisting of Underground Pipelines and Wells under Different Seismic Wave Action	170
Секция 5. Научно-методические и исторические основы механики	171
<i>Кондратьева Э.В.</i> Применение междисциплинарных связей раздела «Механика» с общетехническими дисциплинами при формировании профессиональных компетенций	171
<i>Kondratieva E.V.</i> Application of Interdisciplinary Connections of the Mechanics Section with General Technical Disciplines in the Formation of Professional Competencies	171
<i>Веретимус Д.К., Веретимус Н.К.</i> Роль понятий и соотношений классической механики в изучении курса общей физики	172
<i>Veretimus D.K., Veretimus N.K.</i> The Role of Concepts and Relations of Classical Mechanics in the Study of the Course of General Physics	172
<i>Ламоткин А.Е.</i> Моделирование движения универсального шарнира с использованием кватернионов	173
<i>Lamotkin A.E.</i> Modeling Universal Joint Movement Using Quaternions	173
<i>Орлянская Т.И., Мингалев И.И.</i> Вращение твердого тела вокруг неподвижной точки. Системы углов Эйлера	174
<i>Orlyanskaya T.I., Mingalev I.I.</i> Rotation of a Rigid Body around a Fixed Point. Euler Angle Systems	175
<i>Игнатов А.И., Барышников Ю.Н., Ширшова О.А.</i> Применение матричных вычислений при решении задач теоретической механики методом кинетостатики	175
<i>Ignatov A.I., Baryshnikov Yu.N., Shirshova O.A.</i> Application of Matrix Methods in Solving Tasks of Theoretical Mechanics by Using the d'Alembert Principle	176
<i>Лукин К.Б.</i> Видеоанализ демонстрационных лекционных экспериментов по физическим основам механики	177
<i>Lukin K.B.</i> Video Analysis of Demonstration Lecture Experiments on the Physical Foundations of Mechanics	177
<i>Ковалев М.Д.</i> О структурных формулах и структурных графах в теории механизмов	178

<i>Kovalev M.D.</i> On Structural Formulas and Structural Graphs in Mechanisms Theory	178
<i>Хроматов В.Е., Попов Л.Г., Новикова О.В., Догадина Т.Н.</i> Практические методы изучения механики материалов и высшей математики	179
<i>Khromatov V.Y., Popov L.G., Novikova O.V., Dogadina T.N.</i> Practical Methods for Studying the Mechanics of Materials and Higher Mathematics	179
<i>Беляева З.В., Берестова С.А., Романовская Е.М., Рощева Т.А., Савина Е.А.</i> Независимый тестовый контроль по теоретической механике в УрФУ	180
<i>Belyaeva Z.V., Berestova S.A., Romanovskaya E.M., Roscheva T.A., Savina E.A.</i> Independent Test Control on Theoretical Mechanics at UrFU	180
<i>Стихно К.А., Худорожко М.В.</i> Тестирование на кафедре теоретической механики в МГТУ им. Н.Э. Баумана	181
<i>Stikhno C.A., Khudorozhko M.V.</i> Testing at the Department of Theoretical Mechanics at Bauman Moscow State Technical University	181
<i>Поляхова Е.Н., Королев В.С.</i> Историко-библиографическая и педагогическая значимость работ Ф.А. Цандера по межпланетным космическим перелетам	182
<i>Polyakhova E.N., Korolev V.S.</i> Historical, Bibliographic and Educational Significance of F.A. Tsander's Works on Interplanetary Spaceflights	185
<i>Кондратьев И.М., Богданов А.Н.</i> Стефан Джевецкий: «дедушка русской авиации»	185
<i>Kondratyev I.M., Bogdanov A.N.</i> Stefan Drzewiecki: "The Grandfather of Russian Aviation"	186
<i>Чиненова В.Н.</i> Н.Д. Моисеев и идеи технической устойчивости (к 120-летию со дня рождения)	187
<i>Chinenova V.N.</i> N.D. Moiseev and the Ideas of Technical Stability	188
<i>Шкапов П.М., Базанчук Г.А., Гартиг Е.Б., Кураков С.В.</i> Год 175-летнего юбилея Николая Егоровича Жуковского	189
<i>Shkapov P.M., Bazanchuk G.A., Gartig E.B., Kurakov S.V.</i> The Year of the 175th Anniversary of Nikolai Egorovich Zhukovsky	195

Научное издание

**Международная научная конференция
«Фундаментальные и прикладные
задачи механики»**

Москва, 6–9 декабря 2022 г.

Материалы конференции

Часть 2

Художник *Я.М. Асинкритова*
Компьютерная верстка *С.А. Серебряковой*

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 31.03.2023. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 16,74. Тираж 50 экз.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.
info@bmstu.press
<https://bmstu.press>

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.
baumanprint@gmail.com