

Международная научная конференция «Фундаментальные и прикладные задачи механики», посвященная 100-летию со дня рождения академика Константина Сергеевича Колесникова (Москва, 10–12 декабря 2019 г.): Тезисы докладов / П. М. Шкапов, М. Ю. Баркин, Е. В. Мелкумова, составители. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-2-1960>

---

**Международная научная конференция  
«ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ  
И ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ»,**  
*посвященная 100-летию со дня рождения академика  
Константина Сергеевича Колесникова*  
Москва, 10–12 декабря 2019 г.

**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

*Составители:* П.М. Шкапов, М.Ю. Баркин, Е.В. Мелкумова



**International Scientific Conference  
FUNDAMENTAL AND APPLIED PROBLEMS  
OF MECHANICS (FAPM-2019)**  
*dedicated to the 100th birthday of academician  
Konstantin Sergeevich Kolesnikov*  
Moscow, December 10–12, 2019

**THESES OF REPORTS**

*Compiled by* P.M. Shkapov, M.Yu. Barkin, E.V. Melkumova



Москва  
ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МГТУ им. Н.Э. Баумана  
2020

**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 ученых из ведущих научных учреждений РАН и университетов РФ, ведущих зарубежных ученых-механиков.

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

В 2019 г. конференция *FAPM-2019 посвящена 100-летию со дня рождения академика Константина Сергеевича Колесникова (1919–2016)* — одного из пионеров освоения космического пространства, создателя научно-педагогической школы по динамике ракетно-космических систем, теории колебаний, фронтовика, остававшегося признанным лидером ученых-механиков МВТУ им. Н.Э. Баумана вплоть до своей недавней кончины на 97-м году жизни.

В связи с юбилейной датой К.С. Колесникова во многих докладах сделан акцент на исследования, являющиеся развитием и продолжением его научных и учебно-методических изысканий в современных условиях.

Рабочие языки: русский и английский

Конференция поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант РФФИ № 19-08-20142).

### **Секции конференции**

1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
УСТОЙЧИВОСТЬ, КОЛЕБАНИЯ
2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА. НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА
3. АЭРО- и ГИДРОМЕХАНИКА
4. ОПТИМИЗАЦИЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ  
И ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
5. НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ И ИСТОРИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ МЕХАНИКИ

## Организаторы конференции

Министерство науки и высшего образования РФ  
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  
Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского  
Научно-методический совет по теоретической механике при Минобрнауки РФ

## Международный организационный комитет

Проф. А.А. Александров (председатель), 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  
Проф. В.О. Гладышев (сопредседатель), МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
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. Калининченко, ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия  
Проф. Г.Н. Кувыркин, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
Д-р физ.-мат. наук 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. В.И. Смыслов, ЦАГИ имени проф. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, Россия  
Проф. Ю.П. Улыбышев, РКК «Энергия», г. Королёв, Россия  
Проф. В.Н. Чубариков, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
Проф. А.О. Шимановский, БГУТ, г. Гомель, Республика Беларусь

Ученый секретарь — канд. физ.-мат. наук М.Ю. Баркин

### **Академический комитет**

Академик И.Б. Федоров (председатель), МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Проф. В.Н. Зимин (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 Р.Ф. Ганиев, ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Академик И.Г. Горячева, РНКТПМ, Москва, Россия

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

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

Академик Д.В. Трещёв, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Академик С.Л. Чернышев, ЦАГИ имени 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

Чл.-корр. РАН В.А. Соловьёв, 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.В. Сазонов, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, 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. Ю.Д. Чашечкин, ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

Проф. В.И. Щербаков, ВКА им. А.Ф. Можайского, С.-Петербург, Россия

Ученый секретарь — канд. физ.-мат. наук, доцент Е.В. Мелкумова

#### ***Сайт конференции:***

<http://www.fn.bmstu.ru/coferences-sec-fs/item/885-fapm-2019>

e-mail: [fapm2019@mail.ru](mailto:fapm2019@mail.ru)

## Сепаратрисная модель эффекта Джанибекова

Д.Л. Абраров

НПО ПКРВ, Москва, Россия

E-mail: abrarov@yandex.ru

В рамках модели эффекта Джанибекова на базе уравнений Эйлера — Пуассона гайка движется точно по обратимой сепаратрисе — поверхности в модельном пространстве — времени, представляющую сепаратрису фазовой динамики волчка Эйлера, дополненную действием симметрии обратимости по времени уравнений Эйлера — Пуассона [1]. Эффект Джанибекова в контексте потенциала  $F$  геометрически представляет минимальный (см. ниже) цикл обратимой сепаратрисы.

Обратимая по времени сепаратриса представляет специальную неориентируемую поверхность — 3d-бутылку Клейна, являющуюся стандартным 2d-кубом с упорядоченным групповым отождествлением противоположных граней вдоль его главных диагоналей. Ось гайки движется в точности по диагональному циклу 3d-бутылки Клейна, представляемому осью Галуа — главной диагональю куба, имеющей минимальный ранг при указанном отображении отождествления. Данное «точно» сепаратрисное движение принципиально отличается от «почти» сепаратрисных движений гайки из работы [2].

Модель движения из теоремы ([1]) позволяет рассчитать длину конфигурационного периода кувырков гайки: например, длина этого периода для гайки диаметром 1 см равна 42 см. Можно показать, что эта длина представляет эйлерову характеристику 3d-сферы с аналитической топологией — стандартной функциональной 3d-сферы.

**Ключевые слова:** эффект Джанибекова, уравнения Эйлера — Пуассона, 4-й интеграл.

### Литература

1. *Abbarov D.L.* Exact solvability model of the Euler-Poisson equations in standard Lobachevsky function space. In: 3<sup>rd</sup> Symposium of the BRICS Association on Gravity, Astrophysics and Cosmology. August 29 — September 3, KFU, Kazan, 2019. Program and Abstracts.
2. *Петров А.Г., Володин С.Е.* «Эффект Джанибекова» и законы механики // Докл. Академии наук. 2013. Т. 451, № 4. С. 399–403.

## Separatrix model of the Dzanibekov effect

D.L. Abrarov

NPO PKRV, Moscow, Russia

E-mail: abrarov@yandex.ru

In the framework of the model of the Dzanibekov effect on the basis of the Euler — Poisson equations, the nut moves exactly along the reversible separatrix — the surface in the model space-time, which is the separatrix

of the phase dynamics of the Euler top, supplemented by the action of the time reversibility symmetry of the Euler — Poisson equations, [1]. The Dzanibekov effect in the context of potential  $F$  geometrically represents a minimal cycle of a reversible separatrix.

The time-reversible separatrix represents a special non-orientable surface — a three-dimensional Klein bottle — a standard 2d-cube with ordered group identification of opposite faces along its main diagonals. The axis of the nut moves exactly along the minimum cycle of the Klein 3d-bottle, represented by the Galois axis — the main diagonal of the cube, which has the minimum rank for the indicated identification map. This “exactly” separatrix motion is fundamentally different from the “almost” separatrix motion of [2].

The motion model (see [1]) from the theorem allows us to calculate the length of the configuration period with the flip-flops of the nut: for example, the length of this period for a nut with a diameter of 1 cm. is 42 cm. It can also be shown that this length represents the Euler characteristic of a 3d-sphere with an analytic topology.

**Keywords:** *Dzanibekov effect, Euler — Poisson equations, 4th integral.*

#### References

1. Abrarov D.L. Exact solvability model of the Euler-Poisson equations in standard Lobachevsky function space. *3<sup>rd</sup> Symposium of the BRICS Association on Gravity, Astrophysics and Cosmology. August 29 — September 3, KFU, Kazan, 2019.* Program and Abstracts.
2. Petrov A.G., Volodin S.E. The Janibekov effect and the laws of mechanics. *Doklady Akademii nauk RAS (Reports of the RAS)*, 2013, vol. 451, no. 4, pp. 399–403.

## Mirror symmetry in classical mechanics

Adlaj Semjon

Federal Research Center “Informatics and Control” of the Russian Academy of Sciences  
E-mail: SemjonAdlaj@gmail.com

On June 25th, 1985 the Soviet cosmonaut Vladimir Dzhanibekov recorded a striking observation which became subsequently (yet over a decade later) known, via a video demonstration (from the “Mir” space station), as “the Dzhanibekov effect”. The essence of his observation was most succinctly described by him as a sudden “180 degrees” spin reversal. This concise description, which was ignored by many and noticed by a few, has raised the scrutiny to rigid body dynamics to a new unprecedented level. And it brought to focus the issue of the orientation of motion along with its (spatial) mirror symmetries, as well as, its time reversal symmetries. Furthermore, delving into the exact mathematical description of the (so-called) critical torque free rigid body motion led to a canonical

generalization of the notion of the axis of symmetry of a rigid body when its three moments of inertia are pairwise distinct. Such a “generalized” axis of symmetry has been called a “Galois axis” as was, in particular, presented earlier this year in an eponymous talk. Galois axis is remarkable for rotating uniformly throughout the aforesaid critical rigid body motion, regardless of whether the body “flips” (as Dzhanibekov observed) or maintains permanent rotation! Even more remarkably, two mirror-symmetrical “flips” occur, corresponding to same rotation (either “clockwise” or “counterclockwise”) and sharing one and the same Galois axis! The said duality of critical rigid body motion led to describing the “Dzhanibekov top” as a “classical analogue” of graviton, being the only massless spin-2 elementary particle. As we earlier alluded, one might anticipate that the Galois axis, being fixed within a rigid body, would (indeed) coincide with the axis of symmetry of a dynamically symmetric rigid body. Yet, being orthogonal to the circular sections of MacCullagh ellipsoid (of inertia), it no longer coincides with any principal axis of inertia whenever the moments of inertia are pairwise distinct. We must also note that the said critical motion separates two rigid body motion regimens with (necessarily!) opposing (to each other) orientations, further triggering a determination of underlying chirality of the corresponding (two) pseudovectors of angular momentum and angular velocity.

### **Определение аэродинамических характеристик тонкостенных оболочек при сверхзвуковых скоростях с помощью метода Ньютона**

Н.А. Александрова, А.Ю. Луценко, Д.К. Назарова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: alexandrovan.a@yandex.ru

Пуски всех современных ракет-носителей сопровождаются сбросом отработавших элементов конструкции, которые представляют собой тонкостенные оболочки. После отделения отработавшие элементы конструкции движутся в широком диапазоне скоростей и углов атаки. Для решения задач определения и сокращения районов падения отделяемых частей необходимо иметь представление о статической и динамической устойчивости этих тел. Поэтому исследование стационарных и нестационарных аэродинамических характеристик (АДХ) оболочек представляет практический интерес.

Стационарные АДХ тел вращения и в меньшей степени оболочек исследованы довольно подробно, а определение комплекса аэродинамических производных демпфирования в рамках аэродинамиче-

ского эксперимента или расчета при сверхзвуковых скоростях имеет свою специфику и сложности.

В данной работе рассмотрено применение приближенного метода, основанного на теории Ньютонова торможения. Этот метод известен давно и позволяет оперативно находить значения АДХ тела, минуя предварительный расчет полей газодинамических параметров в потоке. Особый подход, используемый в разработанной программе, написанной на языке программирования Delphi, заключается в применении файлов STL-геометрии тел для нахождения области аэродинамической тени и местных углов между внутренней нормалью к поверхности тела и вектором скорости набегающего потока.

С помощью разработанной программы были проведены тестовые расчеты стационарных и нестационарных АДХ острого конуса. Данные характеристики сравнивались с экспериментальными данными. Расхождение с экспериментом в среднем составляет 10 %.

Применяя особый геометрический подход, заключающийся в построении секущей плоскости по направлению вектора скорости набегающего потока и анализе положения узлов сетки разбиения относительно линии пересечения этой плоскости с поверхностью тела, была проведена модификация разработанной программы, позволяющая рассчитывать тонкостенные оболочки с помощью метода Ньютона. Данные результаты представляют особую ценность, так как АДХ тонкостенных оболочек в отличие от АДХ сплошных тел недостаточно исследованы.

Результатом данной работы стало определение суммарных — стационарных и нестационарных — АДХ тонкостенных круговых оболочек. Полученные значения стационарных АДХ сравнивались с расчетом аналогичной задачи в открытом программном пакете OpanFOAM. Расхождение полученных величин нормальной силы и момента тангажа составляют около 7 %.

**Ключевые слова:** тонкостенные оболочки, метод Ньютона, динамическая устойчивость, нестационарные АДХ.

## **Determination aerodynamic characteristics of thin-walled shells at supersonic speeds using the Newton`s method**

N.A. Alexandrova, A.Yu. Lutsenko, D.K. Nazarova

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: alexandrov.a@yandex.ru

The launches of all modern launch vehicles accompany by the discharge of spent structural elements, which are thin-walled shells. After separation, the spent structural elements move in a wide range of speeds



and angles of attack. To solve the problems of determining and reducing the areas of incidence of detachable parts, it is necessary to have an idea of the static and dynamic stability of these bodies. Therefore, the study of aerodynamic characteristics (ADH) — stationary and dynamic — of shells is of practical interest.

The stationary ADH of bodies of revolution and, to a lesser extent, shells have been studied in sufficient detail, and the determination of the complex of aerodynamic damping derivatives as part of an aerodynamic experiment or calculation at supersonic speeds has its own specificity and complexity.

In the well-known literature, stationary ADH of bodies of revolution have been studied in sufficient detail. However, the definition of a complex of aerodynamic damping derivatives in an aerodynamic experiment at supersonic speeds has the difficulties.

In this paper, we consider the application of the approximate method based on the Newtonian theory of inhibition to the dynamic aerodynamic characteristics calculation. This method has been known for a long time and allows you to quickly find the aerodynamic characteristics values, bypassing the preliminary calculation of the fields of gas-dynamic parameters in the flow. A special approach used in the developed program written in the Delphi programming language is to use the body STL geometry files to find the aerodynamic shadow region and local angles between the internal normal to the body surface and the incoming flow velocity vector.

Using the developed program, test calculations of stationary and non-dynamic ADHs of the acute cone were carried out. These characteristics were compared with experimental data. The discrepancy with the experiment is about 10%.

Using a special geometric approach, which consists in constructing a secant plane in the direction of the flow velocity vector and analyzing the position of the mesh nodes of the partition relative to the intersection line of this plane with the surface of the body, a modification of the developed program was performed, which allows calculating thin-walled shells using the Newton method. These results have particular value, since the ADH of thin-walled shells, in compare to the ADH of solid bodies, is insufficiently studied.

The result of this work was the determination of the total - stationary and non-stationary — ADH of thin-walled circular shells.

The obtained results of stationary ADCs were compared with the calculation of a similar problem in the open software package OpenFOAM. The discrepancy between the obtained values of the normal force and pitch moment is about 7%.

**Keywords:** *thin-walled shells, Newton's method, dynamic stability, damping coefficient.*

## **Экспериментальное определение динамических воздействий для пилотирования квадрокоптера**

М.А. Аникин, Е.С. Бычкова, А.В. Гаркуша,  
А.А. Парфенов, А.Ю. Карпачев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: karpachevay@bmstu.ru

В настоящее время беспилотные летательные аппараты — БПЛА (дроны) переживают новый бурный этап своего развития, в основе которого лежат достижения в создании новых легких и прочных конструкционных материалов, появление энергоемких источников питания, бесколлекторных электродвигателей и т. д. Не менее важную роль играют также и успехи в теоретическом моделировании управления полетами этих робототехнических систем. Однако моделирование любого процесса всегда нуждается в экспериментальном подтверждении и выяснении достоверности наиболее значимых характеристик объекта, их взаимосвязи с теоретической моделью и ее уточнением. Поэтому в задачу исследования входило экспериментальное изучение силовых факторов, формирующих движение квадрокоптера (летательного аппарата с четырьмя несущими винтами), для определения значений характеристик, необходимых для подтверждения правомерности использования разрабатываемых теорий и принимаемых в них гипотез.

Современные мультикоптеры применяются в промышленно-хозяйственных областях деятельности человека, где его пребывание затруднено или связано с риском для жизни. Это разведка в труднодоступных местах, включая зоны с повышенным фоном радиации, поиски пропавших в сложных условиях рельефа местности, аэро-съемка при пожаротушении и многое др. Такая многозначность задач, которые решаются с использованием дронов, обуславливает актуальность разработок, направленных на их совершенствование.

Согласно опубликованным данным, квадрокоптер традиционно воспринимается как летательный аппарат, моделируемый твердым телом с 6-ю степенями свободы. Ориентация его в пространстве задается с помощью углов Эйлера — Крылова, обычно применяемых в авиационной технике, а для описания движения на основе положений динамики составляются дифференциальные уравнения.

Проведение конкретных расчетов требует установления исходных данных, недостоверность которых может свести к нулю ценность получаемого результата.

В предлагаемой работе рассмотрены три основных вида движения квадрокоптера: поступательное движение (при подъеме вверх), вращение вокруг вертикальной оси симметрии (при зависании на

некоторой высоте), плоскопараллельное движение (при горизонтальных полетах на некоторой высоте). Экспериментально установлены значения подъемной силы несущих винтов в зависимости от частоты их вращения. На основе проведенных опытов определены системы сил, обеспечивающие рассматриваемые движения квадрокоптера. Найдены массовые и инерционные характеристики. Экспериментальные исследования проводились с использованием современного измерительного оборудования и приборов бесконтактного действия.

На основе общих теорем динамики и их следствий были составлены дифференциальные уравнения указанных видов движения. Сформулированы и решены соответствующие задачи Коши. Результаты численных расчетов подтверждены данными опытов.

Проведенные исследования и полученные результаты целесообразно принимать во внимание при рассмотрении и изучении более общих видов движения квадрокоптера и оптимизации траекторий его полетов.

**Ключевые слова:** дрон, квадрокоптер, силовые факторы, подъемная сила.

## Experimental determination of dynamic effects for piloting a quadcopter

M.A. Anikin, T.S. Bychkova, A.V. Garkucha,  
A.A. Parfenov, A.Yu. Karpachev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: karpachevay@bmstu.ru

Currently, unmanned aerial vehicles-UAVs (drones) are experiencing a new rapid stage of its development, which is based on achievements in the creation of new lightweight and durable structural materials, the emergence of energy-intensive power sources, brushless motors, etc., equally important role is also played by successes in the theoretical modeling of flight control of these robotic systems. However, modeling of any process always needs experimental confirmation and clarification of the reliability of the most significant characteristics of the object, their relationship with the theoretical model and its refinement. Therefore, the task of the study was the experimental study of the force factors that form the movement of the quadcopter (aircraft with four rotors) in order to determine the values of the characteristics necessary to confirm the validity of the use of the developed theories and hypotheses accepted in them.

Modern multicopters are used in industrial and economic areas of human activity, where his stay is difficult or associated with a risk to life. This exploration in hard-to-reach places including areas with high back-

ground radiation, the search for the missing in difficult terrain conditions, aerial photography in firefighting and much more. Such a multi-meaning tasks that are solved with the use of drones, determines the relevance of developments aimed at improving them.

According to published data, the quadcopter is traditionally perceived as an aircraft modeled by a solid body with 6 degrees of freedom. Its orientation in space is given by Euler — Krylov angles, commonly used in aircraft engineering, and differential equations are drawn up to describe the motion based on the positions of the dynamics.

Carrying out specific calculations requires the establishment of initial data, the unreliability of which can nullify the value of the result.

In the proposed work, three main types of motion of the quadcopter are considered: translational motion (when lifting up), rotation around the vertical axis of symmetry (when hovering at a certain height), plane-parallel motion (for horizontal flights at a certain height). The values of the lifting force of the rotors depending on the frequency of their rotation are experimentally established. On the basis of the conducted experiments the systems of forces providing the considered movements of a quadcopter are defined. Mass and inertial characteristics are found. Experimental studies were carried out with the use of modern measuring equipment and devices non-contact action.

On the basis of General theorems of dynamics and their consequences, differential equations of these types of motion were made. The corresponding Cauchy problems are formulated and solved. The results of numerical calculations are confirmed by experimental data.

The conducted researches and the received results it is expedient to take into account at consideration and studying of more General types of movement of a quadcopter and optimization of trajectories of its flights

**Keywords:** *drone, quadcopter, power factors, lift.*

## **Метод идентификации инерционных характеристик твердого тела**

А.К. Алешин, И.М. Кондратьев

Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
E-mail: aleshin\_ak@mail.ru, kiimash@yandex.ru

Представлен теоретико-экспериментальный метод определения инерционных характеристик твердого тела — массы, положения центра масс и тензора инерции. Метод базируется на совместном применении вычислительного и натурального экспериментов в комплексе с известным технологическим приемом, применяемым при балансировке вращающихся тел — методом пробных грузов [1]. Для прове-

дения экспериментов разработаны измерительный стенд и специальный манипулятор, механизм которого обеспечивает движение исследуемого твердого тела с тремя степенями свободы. Особенность предлагаемого метода состоит в придании твердому телу плоскопараллельного вращения с известными линейными и угловыми перемещениями, задаваемыми в ходе экспериментов. Показано, что регистрируемая реакция динамической системы измерительного стенда на изменения положения исследуемого твердого тела и дополнительных пробных грузов содержит всю необходимую информацию для определения инерционных характеристик тела. Определение инерционных характеристик представляет собой последовательность двух процедур: с помощью первой устанавливаются масса и пространственные координаты центра масс исследуемого тела [2], с помощью второй — определяются компоненты тензора инерции.

**Ключевые слова:** идентификация параметров, инерционные характеристики, метод пробных грузов, плоскопараллельное вращение, тензор инерции.

### Литература

1. Аleshин А.К., Кондратьев И.М. Метод идентификации параметров механизмов циклического действия // В кн.: Фундаментальные и прикладные задачи механики. Тезисы докладов Международной научной конференции, посвященной 170-летию со дня рождения великого русского ученого Н.Е. Жуковского. 2017. С. 147–148.
2. Аleshин А.К. Метод определения массы и координат центра масс тела в заданной плоскости // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 2. С. 9–14.

## A solid body inertia properties identification method

A.K. Aleshin, I.M. Kondrat'ev

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia  
E-mail: aleshin\_ak@mail.ru, kiimash@yandex.ru

Semi-theoretical approach to practical identification of solid body inertia properties such as mass, center of mass location and inertia tensor is presented. This approach is based on common usage of computational and full-scale experiments along with well-known probe mass method [1]. A testing bench and a specific manipulator are developed to run the experiments. The manipulator provides for solid body under investigation a plane parallel rotational motion with three degrees of freedom. As shown the sensed output signals from dynamical system of the testing bench as a function of solid body position and probe mass value carry full infor-

mation to calculate the solid body inertia properties. A procedure to determine inertia properties consists of two phases: (1) mass and center of mass 3D-location computations [2] (2) inertia tensor computation.

**Keywords:** *parameter identification, inertia properties, probe mass method, plane parallel rotation, inertia tensor*

#### References

1. Aleshin A.K., Kondrat'ev I.M. A method for identification of cyclic action mechanism parameters. *Proceedings of the FAPM*, 2017, pp. 147–148 (in Russ.).
2. Aleshin A.K. A method to determine mass and center of mass location on a given plane. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2011, no. 2, pp. 9–14 (in Russ.).

### **Безопасное отделение пилотируемого корабля «Союз МС» от неуправляемой Международной космической станции**

А.С. Анфалов<sup>1</sup>, В.Н. Бакулин<sup>2</sup>, Н.В. Богомолов<sup>1</sup>, С.В. Борзых<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва»,  
г. Королёв, Россия

<sup>2</sup>Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: a\_s\_anfalov@mail.ru, vbak@yandex.ru,  
nbogomolov1992@gmail.com, sergey.borzykh@rsce.ru

В статье рассматривается процесс отделения пилотируемого корабля Союз МС от неуправляемой Международной космической станции (МКС) в текущей конфигурации согласно определенному алгоритму срочного отделения и дальнейшего срочного спуска. Статья описывает результаты моделирования движения МКС гравитационных сил и гравитационных моментов в течение одного витка после потери управления. В статье обоснована применимость алгоритма отделения пилотируемого корабля Союз МС от модулей «Рассвет» и «Поиск» Малого исследовательского модуля в ряде нештатных и аварийных ситуаций, требующих эвакуации экипажа по существующей процедуре.

**Ключевые слова:** *пилотируемый корабль, Международная космическая станция, алгоритм отделения.*

## Soft undocking of Soyuz MS spacecraft from uncontrolled International Space Station

A.S. Anfalov<sup>1</sup>, V.N. Bakulin<sup>2</sup>, N.V. Bogomolov<sup>1</sup>, S.V. Borzykh<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolyov, Russia

<sup>2</sup>Institute of applied mechanics RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: a\_s\_anfalov@mail.ru, vbak@yandex.ru, nbogomolov1992@gmail.com,  
sergey.borzykh@rsce.ru

This paper considers a process of Soyuz MS crew vehicle undocking from uncontrolled International Space Station (ISS) of the current configuration according to certain algorithm of urgent undocking and further urgent descent. The paper describes the results of simulating the ISS motion under gravity force and gravitational torque within one orbit after the loss of control. The paper concludes on applicability of this algorithm for Soyuz MS crew vehicle undocking from Rassvet (MRM1) and Poisk (MRM2) Mini Research Modules in case of any contingency or emergency situation resulting in crew evacuation under the existing procedure.

**Keywords:** crew vehicle, International Space Station, algorithm of undocking.

## Динамика и управление космическим объектом при его бесконтактной транспортировке ионным потоком

В.С. Асланов, А.С. Ледков

Самарский национальный исследовательский университет

имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

E-mail: aslanov\_vs@mail.ru, ledkov@inbox.ru

Проблема транспортировки космических объектов, в том числе и космического мусора, — одна из наиболее актуальных проблем современной космонавтики. Перспективным направлением решения этой проблемы является создание систем бесконтактной транспортировки, главным достоинством которых является отсутствие необходимости в стыковке или механическом захвате космического объекта. В данной работе рассматривается транспортировка крупногабаритного космического объекта посредством ионного потока, генерируемого активным космическим аппаратом. Активный космический аппарат оснащен двумя противоположно направленными ионными двигателями: маршевым и толкающим, который служит для обдува пассивного объекта, оказывая на него силовое воздействие.

Целью работы является исследование движения космического объекта вокруг центра масс в ионном потоке и разработка законов управления, обеспечивающих угловую стабилизацию пассивного космического объекта.

Доклад состоит из трех частей. Первая посвящена определению сил и моментов, действующих на пассивный объект в ионном потоке при сплошном и частичном обдуве. Во второй части с помощью уравнений Лагранжа второго рода строится математическая модель углового движения пассивного объекта под действием сил и моментов от ионного потока, а также гравитационных и аэродинамических сил и моментов. Третья часть сфокусирована на разработке управления ионным потоком для стабилизации пассивного космического объекта. Предложено два закона управления: на основе изменения величины тяги толкающего ионного двигателя и изменения ориентации оси ионного потока. С помощью теоремы Ляпунова об асимптотической устойчивости по первому приближению было доказано, что закон управления величиной тяги обеспечивает асимптотическую устойчивость требуемого положения космического объекта. На основе численного моделирования было показано, что закон управления ориентацией оси ионного потока является более эффективным с точки зрения минимизации времени перевода космического мусора в требуемое положение.

**Ключевые слова:** *космический объект, ионный поток, бесконтактная транспортировка, движение вокруг центра масс, закон управления.*

## **Сергей Алексеевич Чаплыгин — механик и математик, организатор научных исследований (к 150-летию со дня рождения)**

Г.А. Базанчук, Е.Б. Гартиг, В.Я. Томашпольский

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: fn3@bmstu.ru

В докладе дается краткий обзор научной, педагогической, общественной и организационной деятельности Сергея Алексеевича Чаплыгина. Основной акцент сделан на отражении связей с Н.Е. Жуковским, кафедрами и сотрудниками Императорского Московского технического училища, Императорского Московского университета и Центрального аэрогидродинамического института [1].

**Ключевые слова:** *Сергей Алексеевич Чаплыгин, история науки, теоретическая механика, математика, аэрогидродинамика, Императорское Московское техническое училище, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГУ, ЦАГИ имени профессора Н.Е. Жуковского.*



## Литература

1. Базанчук Г.А., Гартиг Е.Б., Томашпольский В.Я. Сергей Алексеевич Чаплыгин — механик и математик, организатор научных исследований (к 150-летию со дня рождения) // *Машиностроение и компьютерные технологии*. 2019. № 4. С. 42–49. URL: <https://www.technomagelpub.ru/jour/article/view/1495/1269>

### **Sergey Alekseevich Chaplygin as a mechanic and mathematician, organizer of scientific research (On the 150th anniversary of his birth)**

G.A. Bazanchuk, E.B. Gartig, V.Ya. Tomashpolsky

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: fn3@bmstu.ru

The report gives a brief overview of the scientific, pedagogical, social and organizational activities of Sergei Alekseevich Chaplygin. The main emphasis is on reflecting ties with N.E. Zhukovsky, with departments and employees of the Imperial Moscow Technical School, the Imperial Moscow University and the Central Aerohydrodynamic Institute [1].

**Keywords:** *Sergey Alekseevich Chaplygin, history of science, theoretical mechanics, mathematics, aerohydrodynamics, Imperial Moscow Technical School, Bauman MSTU, Moscow State University, TsAGI named after Professor N.E. Zhukovsky.*

## References

1. Bazanchuk G.A., Gartig E.B., Tomashpolsky V.Ya. Sergey Alekseevich Chaplygin — mechanic and mathematician, organizer of scientific research (on the 150th anniversary of his birth). *Mechanical Engineering and Computer Science*, 2019;(4):42-49. (In Russ.). Available at: <https://www.technomagelpub.ru/jour/article/view/1495/1269>

### **Термомеханические колебания газа в удлиненном сосуде при наличии неоднородности**

В.Г. Байдулов<sup>1,2</sup>, Пью Ко Ко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: fn3@bmstu.ru

Численно-аналитическими методами рассмотрено влияние неоднородности в профиле сосуда и базовом распределении температуры на собственные колебания газа в сосуде. Существенное влияние на собственные колебания газа оказывают типы граничных условий. Представляет предварительный конструктивный интерес относи-

тельно просто реализуемые варианты: 1) открытые концы; 2) закрытые твердой крышкой концы; 3) смешанный вариант закрытого и открытого концов сосуда. Сильное влияние на частоты и формы этих колебаний могут оказывать изменяемые или регулируемые параметры фиксированного положения неоднородности и величины радиуса отверстия в ней и др. Изучено влияние значений параметров неоднородности в сосуде, изменяющихся в широком диапазоне (близкому к предельно допустимому).

*Работа выполнена по теме государственного задания № АААА-А17-117021310385-0.*

## **Моделирование напряженно-деформированного состояния трехслойных оболочек с прямоугольными вырезами**

В.Н. Бакулин

Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия

E-mail: vbak@yandex.ru

Трехслойные оболочки являются распространенными элементами современной техники. Это вызвано высокой весовой эффективностью и жесткостью, высокими тепло-, звуко-, виброизоляционными характеристиками трехслойных конструкций. Предлагается подход послойного моделирования и алгоритмы построения уточненных моделей исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) трехслойных нерегулярных оболочек [1–5], с помощью которых изучено НДС трехслойных оболочек с прямоугольными вырезами. Приводятся результаты исследования.

*Исследование частично выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 19-08-00125а.*

**Ключевые слова:** *трехслойные оболочки, прямоугольные вырезы, напряженно-деформированное состояние, послойный анализ, уточненные модели.*

### **Литература**

1. Бакулин В.Н. Уточненная модель послойного анализа трехслойных нерегулярных конических оболочек // Доклады Академии наук. 2017. Т. 472, № 3. С. 272–277.
2. Бакулин В.Н. Эффективная модель послойного анализа трехслойных нерегулярных оболочек вращения цилиндрической формы // Доклады Академии наук. 2018. Т. 478, № 2. С. 148–152.
3. Бакулин В.Н. Блочная конечно-элементная модель послойного анализа трехслойных в общем случае нерегулярных оболочек вращения двойной кривизны // Доклады Академии наук. 2019. Т. 484, № 1. С. 35–40.

4. Бакулин В.Н. Блочная конечно-элементная модель для послойного анализа напряженно- деформированного состояния трехслойных оболочек с нерегулярной структурой // Изв. РАН. МТТ. 2018, № 4, С. 65–72.
5. Бакулин В.Н. Модель для уточненного расчета напряженно-деформированного состояния трехслойных конических нерегулярных оболочек // Прикладная математика и механика. 2019. Т. 83, № 2. С. 315–327.

## **Modeling of the stress and strain state of sandwich shells with rectangular cutouts**

V.N. Bakulin

Institute of Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
E-mail: vbak@yandex.ru

Sandwich shells are common elements of modern engineering structures. An approach for layer-by-layer modeling and algorithms for building refined models for studying the stress and strain state of irregular sandwich shells [1–5] are proposed with which the stress and strain state of sandwich shells with rectangular cutouts was studied. The results of the study are presented.

*Work is made with financial support from the Russian Foundation of Basic Researches No. 19-08-00125a.*

**Keywords:** *sandwich shells, rectangular cutouts, stress and strain state, layer-by-layer analysis, refined models.*

### **References**

1. Bakulin V.N. A Corrected Model of Level-by-Level Analysis of Three-Layer Irregular Conical Shells. *Doklady Physics*, 2017, vol. 62 (1), pp. 37–41.
2. Bakulin V.N. An Efficient Model for Layer-by-Layer Analysis of Sandwich Irregular Cylindrical Shells of Revolution. *Doklady Physics*, 2018, vol. 63 (1), pp. 23–27.
3. Bakulin V.N. Block Finite-Element Model of Layer-by-Layer Analysis of the Stress-Strain State of Three-Layer Generally Irregular Shells of Double-Curvature Revolution. *Doklady Physics*, 2019, vol. 64, no. 1, pp. 9–14.
4. Bakulin V.N. Block Based Finite Element Model for Layer Analysis of Stress Strain State of Three-Layered Shells with Irregular Structure. *Mechanics of Solids*, 2018, vol. 53 (4), pp. 411–417.
5. Bakulin V.N. Model of Refined Analysis of Stress-Strain State of Three-Layer Conical Irregular Shells. *J. Appl. Math. Mech.*, 2019, vol. 83, no. 2, pp. 315–327.

## **Взрывные технологии для прочностных испытаний тонкостенных композитных конструкций на действие боковых нестационарных нагрузок**

В.Н. Бакулин<sup>1</sup>, А.В. Острик<sup>2</sup>, Д.Н. Николаев<sup>2</sup>, А.А. Чепрунов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Россия  
E-mail: vbak@yandex.ru, ostrik@frcp.ac.ru, nik@frcp.ac.ru

Тонкостенные композитные конструкции ракетно-космической техники (РКТ) находятся под действием полетных нагрузок и внешних воздействий различной физической природы. Полетные нагрузки, как правило, являются осесимметричными и квазистационарными. Методы прочностных расчетов на нагрузки такого типа хорошо разработаны и внедрены в практику проектирования элементов конструкций РКТ. В то же время внешние воздействия в большинстве случаев носят односторонний и нестационарный характер. Результаты расчетов на прочность в этом случае не столь достоверны, и требуется проведение прочностных испытаний на действие боковых нестационарных нагрузок.

Описывается набор газодинамических устройств для генерации боковых нестационарных нагрузок различной физической природы. Предлагаются два новых взрывных устройства для создания малоимпульсных нагрузок микросекундной длительности. Рассматриваются методы измерения параметров реакции тонкостенных композитных конструкций на действие динамических и импульсных нагрузок. Предлагается новый метод регистрации развития нестационарного прогиба конструкций на оболочечной стадии деформирования.

Приводятся результаты ударно-волновых испытаний угле- и органо-пластиков при их нагружении посредством детонации взрывчатых веществ или электрическим взрывом фольги. Показано, что на величину откольного напряжения оказывает влияние тип связующего.

На прочность к оболочечной стадии деформирования испытывались цилиндрические стеклопластиковые оболочки. Получено, что использование проволочных или фольговых датчиков для измерения деформаций приводит к близким результатам.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 18-08-00094-а, № 19-08-00606-а).*

**Ключевые слова:** тонкостенные композитные конструкции, прочностные испытания, взрывные газодинамические устройства, измерение нестационарных параметров деформирования твердых тел.

## **Explosive technologies for strength tests of thin-walled composite constructions on action of side non-stationary loadings**

V.N. Bakulin<sup>1</sup>, A.V. Ostriк<sup>2</sup>, D.N. Nikolaev<sup>2</sup>, A.A. Cheprunov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics of the RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institute of Problems of Chemical Physics of the RAS, Chernigolovka, Russia  
E-mail: vbak@yandex.ru, ostrik@fcp.ac.ru, nik@fcp.ac.ru

A set of gasdynamic devices for generation of side non-stationary loadings of various physical natures is described. Two new explosive devices for formation of low-pulse loadings of microsecond duration are offered. Methods of measurement of parameters of reaction of thin-walled composite constructions to action of dynamic and pulse loads are considered. The new method for registration of development of non-stationary displacements at the shell stage of deformation is offered.

Results of shock and wave tests carbon- and organoplastics are given. It is received that use of wire or foil sensors for measurement of deformations yield close results when the shell stage of deformation of fiberglass thin-walled constructions is investigated.

*Work is carried out with financial support from the Russian Foundation of Basic Researches (No. 18-08-0094-a,) No. 19-08-00606-a.*

**Keywords:** *thin-walled composite constructions; strength tests; explosive gas-dynamic devices: measurement of non-stationary parameters of solid bodies' deformation.*

## **Имитационная модель технологического процесса стерилизации материалов как эффективный инструмент при разработке и модернизации стерилизационных установок**

М.Г. Балыхин<sup>1</sup>, И.Г. Благовещенский<sup>1,2</sup>, С.А. Мокрушин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МГУПП, Москва, Россия

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: mmb@mgupp.ru

Рассматривается задача по выведению из эксплуатации старого неэффективного оборудования и внедрению нового, соответствующего современным требованиям по качеству и энергоэффективности, а также использованию инновационных технологий в производственном процессе. В докладе обсуждается проблема разработки имитационной модели для описания технологического процесса сте-

рилизации различных продуктов. Даются рекомендации по применению модели в модернизации стерилизационных установок. При проведении исследований применялась теория и пакеты программ математического моделирования. Разработанная имитационная модель учитывает взаимодействие параметров, отражающих поведение исследуемой системы, адекватно отражает течение реального технологического процесса, позволяет учесть теплофизические свойства стерилизуемых материалов, влияние технологических возмущений и индивидуальные характеристики установки. Созданы предпосылки к использованию имитационной модели в разработке эффективных стерилизационных установок для малых предприятий и крупных производств, а также совершенствования существующих стерилизационных аппаратов с использованием разработанной математической модели технологического процесса стерилизации материалов в промышленном автоклаве.

**Ключевые слова:** имитационная модель, стерилизация материалов, технологический процесс, температура, давление, стерилизационная установка, автоклав.

### **Simulation model of the technological process of sterilization of materials as an effective tool in the development and modernization of sterilization plants**

M.G. Balykhin<sup>1</sup>, I.G. Blagoveshchensky<sup>1,2</sup>, S.A. Mokrushin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>MGUPP, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: mmb@mgupp.ru

The problem of decommissioning of old inefficient equipment and introduction of new, corresponding to modern requirements for quality and energy efficiency, as well as the use of innovative technologies in the production process is considered. The article discusses the problem of developing a simulation model to describe the technological process of sterilization of canned food. Recommendations for the use of the model in the modernization of sterilization plants are given. During the research, the theory and software packages of mathematical modeling were used. The developed simulation model considers interaction of parameters reflecting the behaviour of the system under study adequately reflects the technological process allows to take into account thermophysical properties of sterilizable materials, the impact of technological disturbances and individual characteristics of the installation. Prerequisites for the use of the simulation model in the development of effective sterilization facilities for small enterprises and large industries, as well as the im-

provement of existing sterilization devices using the developed mathematical model of the technological process of sterilization of materials in an industrial autoclave.

**Keywords:** *simulation model, sterilization of materials, technological process, temperature, pressure, sterilization plant, autoclave.*

## Физические колебания Луны, вызванные ее приливными деформациями

М.Ю. Баркин<sup>1</sup>, П.М. Шкапов<sup>1</sup>, Hanada Hideo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальная астрономическая обсерватория Японии, Ошу, Япония

E-mail: fn3@bmstu.ru

Луна, как и Земля, не является полностью твердой и испытывает деформационные изменения, например, из-за приливов, вызванных гравитационным притяжением земной орбиты в сложном и резонансном характере движения Луны. Показано, что эти деформации приводят к временным вариациям компонент тензора инерции Луны и, как следствие, к вариациям в движении полюсов Луны, а также к вариациям осевого вращения. Указанный модуль вариации находится в порядке 10–12 мас (миллисекунда дуги). Существуют вариации, имеющие важное значение для развития высокоточной теории физической либрации Луны, пригодные для современных проектов по рекультивации Луны, в частности японский проект ИЛОМ, предусматривающий установку телескопа на лунную поверхность и определение точности его ориентации порядка 1–0,1 МСД, а также российская лунная программа, предусматривающая запуск пяти автоматических станций на Луну в 2019–2024 гг.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РГНФ № 17-71-10254).*

**Ключевые слова:** *физические колебания Луны, приливные деформации, приливные эффекты, вращение Луны, селенопотенциал.*

## The physical librations of the Moon caused by its tidal deformations

M.Yu. Barkin<sup>1</sup>, P.M. Shkapov<sup>1</sup>, Hanada Hideo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> National Astronomical Observatory of Japan, Oshu, Japan  
E-mail: fn3@bmstu.ru

The Moon, like Earth, is not completely solid, and experiences deformation changes, for example due to the tides, caused by the gravitational pull of the Earth's orbit in a complex and resonant nature of the motion of the Moon. It is shown that these deformations lead to temporary variations of Moon inertia tensor components and consequently to the variations in the movement of the poles of the Moon, as well as to the variations of axial rotation. The indicated variations module is in the order of 10–12 mas (millisecond of arc). These variations are important for the development of the high-precision theory of lunar physical libration, suitable for modern projects for the reclamation of the Moon, in particular the Japanese project ILOM, which contemplates installing the telescope on the lunar surface and determining its orientation accuracy of the order of 1–0.1 msd, as well as the Russian lunar program, providing the launch of five automatic stations to the Moon in 2019–2024.

*The research was carried out with the financial support of the RSF (Grant No. 17-71-10254).*

**Keywords:** *physical librations of the moon, tidal deformations, tidal effects, rotation of the moon, selenopotential.*

## Математическое моделирование процесса погрузки автомобиля-самосвала

Ю.Н. Барышников, А.В. Паншина

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: fn3@bmstu.ru

Исследуется проблема ударного воздействия груза на подвеску при погрузке автомобиля-самосвала. Автомобиль моделируется жесткой балкой на двух упругих опорах различной жесткости с учетом линейно-вязкого сопротивления подвески. Удар груза абсолютно неупругий в центр масс балки. Математическая модель автомобиля построена на основе уравнений Лагранжа 2-го рода в виде системы двух неоднородных линейных дифференциальных уравнений малых колебаний системы. Получены аналитические решения системы без



учета и с учетом сопротивления амортизаторов подвески. На основе полученных результатов разработан алгоритм расчета усилий в подвесках. Проведен численный эксперимент погрузки автомобиля БелАЗ-7555В.

**Ключевые слова:** автомобиль, погрузка, математическая модель, удар.

## Mathematical modeling of the loading process of a dump truck

Yu.N. Baryshnikov, A.V. Panshina

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: fn3@bmstu.ru

The problem of the impact of cargo on the suspension when loading a dump truck is investigated. The car is modeled by a rigid beam on two elastic supports of different stiffness, taking into account the linearly viscous suspension resistance. The impact of the load is absolutely inelastic in the center of mass of the beam. The mathematical model of the car is built on the basis of Lagrange equations of the 2nd kind in the form of a system of two heterogeneous linear differential equations of small oscillations of the system. The analytical solutions of the system are obtained without and taking into account the resistance of the suspension shock absorbers. Based on the results obtained, an algorithm for calculating the efforts in suspensions is developed. A numerical experiment of loading a BelAZ-7555B car was carried out.

**Keywords:** dump truck, loading process, mathematical modeling, impact process.

## Проектное обучение в рамках общинженерной подготовки в Уральском федеральном университете

С.А. Берестова

УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
E-mail: s.a.berestova@urfu.ru

Проектное обучение призвано к устранению проблемы в сфере подготовки высококвалифицированных специалистов, а именно отсутствию связующего смыслового звена между рабочей программой общинженерных дисциплин и областью применения в профессиональной деятельности получаемых компетенций. Проектное обучение позволяет объединить в единое смысловое пространство осваиваемые в процессе обучения компетенции и их практическое

использование. Развитие и расширение кругозора в области современных мировых инженерных разработок, научных теорий, высокотехнологического производства на стадии закладки общеинженерных знаний должно происходить на первых курсах обучения.

Для создания мотивации по освоению студентами общепрофессиональных знаний и компетенций на протяжении всего периода обучения в вузе, повышения эффективности преподавания общеинженерных дисциплин в Уральском федеральном университете вводится технология проектного обучения. С введением собственных образовательных стандартов проекты прочно занимают свое место в учебных планах бакалавриата, составляя десятую часть учебной нагрузки за время обучения в вузе. Проектная работа делится на проекты различного уровня в рамках дисциплины или модуля, которые являются итогом самостоятельной учебной работы студента, выполняемой по заданию руководителя проекта и сопровождающейся консультированием куратора проекта. Проект содержит результаты теоретических или экспериментальных исследований, решения технических задач. Он направлен на формирование компетенций, развиваемых в рамках изучения модуля, и носит междисциплинарный характер. Выполнение проекта по модулю проводится с целью формирования у студентов опыта комплексного решения задач. В качестве объекта исследования выбирается реальный инженерный объект. Проект является отдельным компонентом образовательной программы, входит отдельной строкой в учебный план, промежуточная аттестация проводится в форме защиты проекта перед экспертной комиссией. Проекты могут выполняться как индивидуально, так и командами по 2-5 человек с обязательной конкретизацией объема и видов выполняемых этапов проекта каждого студента в группе.

Теоретическая механика, дисциплина учебных планов направлений подготовки из области «Инженерное дело, технологии и технические науки», входит в состав модулей по общеинженерной подготовке и зачастую является базовой частью проекта по модулю. Примером проекта по модулю может служить разработка и расчет электрической тали для условного производственного участка, определенных условий и режимов работы. Проект охватывает такие дисциплины, как инженерная графика, математика, теоретическая механика, сопротивление материалов, детали машин, электротехника, подъемно-транспортные машины.

Для масштабной реализации проектного подхода в УрФУ создается интерактивная площадка, где руководители образовательных программ, представители работодателей могут разместить задания к проектам. Там же они могут отслеживать ход выполнения проекта, знакомиться с научными изысканиями и инженерными разработками студентов. Такой подход решает также задачу продвижения студен-

тов как будущих специалистов на рынке труда посредством личных портфолио, знакомит студентов с реальным сектором экономики, предприятиями, вакансиями. Уже на стадии обучения у студентов есть возможность проанализировать, где требуются специалисты получаемой ими в вузе квалификации.

**Ключевые слова:** *междисциплинарный проект, технология обучения, практико-ориентированный подход, теоретическая механика.*

## **Project-based learning at the Ural Federal University**

S.A. Berestova

Ural Federal University named after the first President of Russia Boris Yeltsin  
E-mail: s.a.berestova@urfu.ru

Project-based learning is designed to eliminate the problem in the field of training of highly qualified specialists. There is no connection between the curriculum of general engineering disciplines and the field of application of the acquired competencies in professional activity. Project-based learning integrates the skills and their practical using. General engineering competencies are formed in the first years of training. At this time, the development and expansion of competency in the field of engineering should occur.

At the Ural Federal University is actively implementing a project-based learning technology. This motivates students to obtain General professional knowledge and competencies throughout the period of study at the University. This increases the efficiency of teaching General engineering disciplines. The University has its own educational standards approved. Projects have a strong place in the undergraduate curriculum. The project activity is the tenth part of the teaching load while studying at the University.

Project work is divided into projects of different levels. These are projects that are implemented either within the discipline or within the module. The project is the result of independent work of the student.

The project Manager formulates the task for the project. Work on the project is accompanied by consultations of the project curator. The project contains the results of theoretical or experimental studies, solutions of technical problems. It is aimed at the formation of competencies developed within the study module. It is interdisciplinary in nature. Students gain experience in complex problem solving in the course of the project. The object of research is a real engineering object.

The project is a separate component of the educational program. This is a separate line of the curriculum. Interim certification is carried out in the form of protection of the project before the expert Commission. Pro-

jects can be performed individually. Also, teams of 2–5 people implement the proposed projects. At the same time, the scope, types of work, the role of each student in the group is necessarily specified.

Theoretical mechanics is a discipline of curriculum areas of training in the field of "Engineering, technology and technical Sciences". It is part of the General engineering training modules. Theoretical mechanics is the basic part of the project modulo. An example of a module project is the development and calculation of an electric hoist. Conditional production site, certain operating conditions and operating modes are determined by technical set of requirements. The project covers a range of disciplines. There are Engineering graphics, mathematics, theoretical mechanics, resistance of materials, machine parts, electrical engineering and others.

The interactive platform is created in Ural Federal University for large-scale implementation of the project approach to training. On this site, heads of educational programs, representatives of employer's place tasks for projects. The project Manager can monitor the progress of the project at this site. He can get acquainted with scientific researches and engineering developments of students. Thus, the student's portfolio is formed. This approach also solves the problem of promoting students as future professionals in the labor market. He also introduces students to the real sector of the economy, enterprises, and vacancies. Already at the stage of training, students can analyze the demand for specialists of the qualification they receive at the University.

**Keywords:** *interdisciplinary project, education technology, practice-oriented approach, theoretical mechanics.*

## **Проблемы, перспективы и возможные технологические решения преподавания механики в современных условиях**

В.Д. Бертяев, Л.П. Семенова, О.А. Ткач

Тульский государственный университет, Тула, Россия  
E-mail: vit\_59@mail.ru

Проводится анализ современного состояния высшего образования в РФ, а также оценка классической и дистанционной технологии обучения. Рассматривается вопрос повышения его эффективности и предлагается технологическая модель применения информационных технологий при изучении фундаментальных инженерных дисциплин. Излагается опыт применения информационных технологий при изучении теоретической механики на инженерных специальностях и направлениях подготовки в Тульском государственном университете [1–4].

**Ключевые слова:** теоретическая механика, аудиторские занятия, специализированная аудитория, мультимедийное оборудование, самостоятельная работа студентов, математически-ориентированные среды.

### Литература

1. Бертяев В.Д. Преподавание теоретической механики в современных условиях. Проблемы и решения // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник трудов. Казань: Изд-во КФУ, 2015. С. 466–469.
2. Бертяев В.Д. Теоретическая механика: электронный интерактивный курс. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 396 с.
3. Бертяев В.Д. Теоретическая механика на базе Mathcad. Практикум: учебное пособие / Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2005. 752 с.
4. Бертяев В.Д., Булатов Л.А., Латышев В.И., Митяев А.Г. Теоретическая механика. Курсовые работы с использованием Mathcad. Москва: АСВ, 2010. 304 с.

## Problems, prospects and possible technological solutions teaching mechanics in modern conditions

V.D. Bertyaev, L.P. Semenova, O.A. Tkach

Tula state University, Tula, Russia  
E-mail: vit\_59@mail.ru

The higher education in the Russian Federation current state is analyzed, classical and distance-learning technologies are estimated. The question of efficiency increasing is considered. The technological model of information technology application of fundamental engineering disciplines study is proposed. The article describes the experience of using information technologies in the theoretical mechanics study in engineering specialties at Tula state University [1–4].

**Keywords:** *theoretical mechanics, classroom, specialized audience, multimedia equipment, student's independent work, mathematically oriented environment.*

### References

1. Bertyaev V.D., The teaching of theoretical mechanics in the modern world. Problems and solutions. *XI all-Russian Congress on fundamental problems of theoretical and applied mechanics: proceedings*. Kazan, KFU Publ., 2015. Pp. 466–469.
2. Bertyaev V.D. *Theoretical mechanics electronic interactive course: textbook*. Tula, TulSU Publ., 2015, 396 p.
3. Bertyaev V.D. *Theoretical mechanics on the basis of Mathcad. Workshop: Training manual*. Saint Petersburg, BHV-Petersburg, 2005, 752 p.
4. Bertyaev V.D., Bulatov L.A., Latyshev V.I., Mityaev A.G. *Theoretical mechanics. Coursework using Mathcad: textbook*. Moscow, ASV, 2010, 304 p.

## Открытые международные интернет-олимпиады по теоретической механике 2010–2019 гг.

В.Д. Бертяев, Л.П. Семенова, О.А. Ткач

Тульский государственный университет, Тула, Россия  
E-mail: vit\_59@mail.ru

Рассматриваются открытые международные интернет-олимпиады по теоретической механике, которые проводятся на базе Марийского государственного технического университета с участием Научно-исследовательского института мониторинга качества образования в г. Йошкар-Ола с 2010 г. Приводится анализ технологии проведения олимпиад, методического обеспечения, количества участвующих вузов и числа студентов, качества предлагаемых задач, методики расчета и начисления баллов. Отмечается, что несмотря на существующие недостатки в методическом обеспечении, некорректностях в формулировках ряда заданий и прочих замечаниях общая динамика развития и совершенствования интернет-олимпиад заслуживает положительной оценки.

**Ключевые слова:** теоретическая механика, международная олимпиада, базовые вузы, специализированная аудитория, доступ в Интернет, коэффициент решаемости, результаты и победители олимпиады.

### Литература

1. Открытые студенческие интернет-олимпиады. Главная страница: портал. [Электронный ресурс]. URL: <https://olymp.i-exam.ru/>
2. Открытые студенческие интернет-олимпиады. Методическое обеспечение. Онлайн-тренинги: портал. [Электронный ресурс]. URL: <http://test.i-exam.ru/training/olymp/index.html>

## Open international Internet Olympiads in theoretical mechanics 2010-2019

V.D. Bertyaev, L.P. Semenova, O.A. Tkach

Tula State University, Tula, Russia  
E-mail: vit\_59@mail.ru

The open international Internet Olympiads on theoretical mechanics are considered. They are held in the Mari state technical University with the participation of the Research Institute for the quality of education monitoring in Yoshkar-Ola since 2010. The technology of Olympiads, methodological support, the number of participating universities and the number of students, the quality of the proposed tasks, and methods of point's calculation are analyzing. It is noted, that despite the existing

shortcomings in the methodological support, inaccuracies in the wording of a number of tasks and other comments, the overall dynamics of the development and improvement of Internet Olympiads deserves a positive assessment.

**Keywords:** *theoretical mechanics, international Olympiad, basic universities, specialized audience, Internet access, solvability coefficient, results and winners of the Olympiad.*

### References

1. Open student Internet-Olympiad. Home page: portal. Available at: <https://olymp.i-exam.ru/>
2. Open student Internet-Olympiad. Methodological support. Online trainings: portal. Available at: <http://test.i-exam.ru/training/olymp/index.html>

## Автоматизированные учебные курсы по теоретической и аналитической механике

В.Д. Бертяев<sup>1</sup>, В.С. Ручинский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Тульский государственный университет, Тула, Россия

<sup>2</sup>Московский авиационный институт, Москва, Россия

E-mail: vit\_59@mail.ru, 2svr@mail.ru

Теоретическая и аналитическая механика представляет собой одну из основополагающих дисциплин высшей школы, обеспечивающей общенаучную инженерную подготовку студентов. В докладе рассматриваются методические вопросы организации учебно-исследовательской работы студентов с помощью автоматизированных учебных курсов по теоретической и аналитической механике. Представлен пример альбома заданий, содержащий перечень схем, входящих в банк заданий программного продукта. Приведены основные теоретические аспекты рассматриваемых задач. Рассмотрена структура и основные принципы работы с программным обеспечением и математически-ориентированной средой.

В автоматизированном учебном курсе имеется развитая система помощи, при этом в поле расчетной схемы появится меню с разделами помощи. В «меню настройки режима» предусмотрен выбор различных параметров режима работы.

На первом этапе составляется дифференциальное уравнение движения механической системы по исходным параметрам, которые находятся в окне данных. Правильность составленного уравнения контролируется путем ввода численных значений коэффициентов дифференциального уравнения. По окончании данного этапа в специальном окне появляется график движения, соответствующий диф-

ференциальному уравнению с ранее определенными коэффициентами. На любом этапе работы имеется возможность посмотреть движение тел механической системы с текущими параметрами в режиме мультипликации. Режим мультипликации можно воспроизводить необходимое количество раз.

Второй этап является исследовательским. На этом этапе исследование проводится путем варьирования одного из параметров механической системы. Изменения, которые возникают в процессе движения, отражаются на графиках, изображенных в специальном окне. Первоначальный график движения изображается красным цветом, график, построенный с учетом изменений, — синим. Альтернативное меню предлагает оставить один из графиков. Если тенденция изменения движения соответствует индивидуальному учебно-исследовательскому заданию, то оставляется новый (синий) график и сохраняются в памяти все внесенные изменения. В противном случае значения параметров остаются прежними. Этот цикл повторяется, пока соотношение параметров не будет соответствовать тому типу процесса, который требуется получить по условию задачи. Осуществление изменения шага по времени позволяет просматривать движение тел механической системы в режиме мультипликации при замедленном, нормальном или ускоренном воспроизведении.

**Ключевые слова:** теоретическая и аналитическая механика, автоматизированные учебные курсы, учебно-исследовательские работы студентов, математически ориентированная среда.

## **Automated training courses in theoretical and analytical mechanics**

V. D. Bertyaev<sup>1</sup>, V.S. Ruchinskiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tula State University, Tula, Russia,

<sup>2</sup> Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

E-mail: vit\_59@mail.ru, 2svr@mail.ru

Theoretical and analytical mechanics is one of the fundamental disciplines of higher education, providing General scientific engineering training of students. The report discusses the methodological issues of the organization of educational and research work of students with the help of automated training courses in theoretical and analytical mechanics. An example of a job album containing a list of schemes included in the job Bank of the software product is presented. The main theoretical aspects of the problems are presented. The structure and basic principles of work with software and mathematically-oriented environment are considered.

The automated training course has a developed help system, and a menu with help sections will appear in the field of the calculation



scheme. In the "setup menu mode" allows you to choose various parameters of operation.

At the first stage, the differential equation of motion of the mechanical system according to the initial parameters, which are in the data window, is compiled. The correctness of the equation is controlled by entering the numerical values of the coefficients of the differential equation. At the end of this stage, a motion graph corresponding to the differential equation with previously defined coefficients appears in a special window. At any stage of operation it is possible to see the movement of bodies of the mechanical system with the current parameters in the animation mode. The animation mode can be played the required number of times.

The second stage is research. At this stage, the study is carried out by varying one of the parameters of the mechanical system. Changes that occur during the movement are reflected in the graphs shown in a special window. The original schedule is shown in red, the schedule built with the changes-in blue. The alternative menu offers to leave one of the graphs. If the trend of movement change corresponds to the individual educational and research task, then a new (blue) graph is left and all the introduced changes are stored in the memory. Otherwise, the parameter values remain the same. This cycle is repeated until the ratio of the parameters will correspond to the type of process that is required to obtain according to the problem. The implementation of changes in the time step, allows you to view the movement of the bodies of the mechanical system in the animation mode with slow, normal or accelerated playback.

**Keywords:** *theoretical and analytical mechanics, automated training courses, educational and research work of students, mathematical-oriented environment.*

## **Компьютерное обеспечение курса теоретической и аналитической механики в условиях перманентной тенденции к сокращению объемов учебных занятий**

В.Д. Бертяев<sup>1</sup>, В.С. Ручинский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Тульский государственный университет, Тула, Россия

<sup>2</sup>Московский авиационный институт, Москва, Россия  
E-mail: vit\_59@mail.ru, 2svr@mail.ru

Доклад посвящен применению современных математических сред на примере пакета Mathcad при изучении теоретической и аналитической механики. Приведена информация о системе дистанционного обучения, описан учебно-методический комплекс (УМК)

по теоретической и аналитической механике, рассмотрены возможные технологии и имеющийся опыт использования УМК в учебном процессе.

Представленный курс лекций следует рассматривать как продолжение работы по разработке и созданию методического обеспечения курса теоретической и аналитической механики в условиях перманентной тенденции к сокращению объемов лекционных и практических занятий. Изложение теоретического и практического материала сопровождается широким спектром графической и видеоинтерпретаций и не требует для освоения и понимания знаний специальных разделов высшей математики. Для установки курса необходимо скачать образ DVD-диска (в формате \*.iso), распаковать образ в отдельную папку или воспользоваться бесплатными программами, которые работают с образами DVD-дисков (Windows, Daemon Tools и др.). Возможна работа с отдельными файлами, имеющими расширение «\*.ppsx».

Имеется специальный файл «Пустая.ppsx», который содержит 10 пустых слайдов и предназначен для оперативного проведения аудиторного занятия, тема которого отсутствует в данном курсе. Для работы с курсом необходимо следующее программное обеспечение: программы просмотра файлов презентаций, совместимых с Microsoft Office 2007, 2010, 2013 и выше; программы для просмотра видеофайлов \*.avi, \*.mp4.

При проведении преподавателями аудиторных занятий необходимо иметь специализированную аудиторию, оснащенную обычным персональным компьютером с активной электронной доской. Возможна организация работы в локальной сети.

**Ключевые слова:** теоретическая и аналитическая механика, дистанционное обучение, учебно-методический комплекс, математически ориентированная среда, пакет Mathcad.

### **Computer support of the course of theoretical and analytical mechanics in the conditions of permanent tendency to reduction of volumes training session**

V.D. Bertyaev<sup>1</sup>, V.S. Ruchinskiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tula State University, Tula, Russia,

<sup>2</sup>Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

E-mail: vit\_59@mail.ru, 2svr@mail.ru

The report is devoted to the application of modern mathematical environments on the example of the Mathcad package in the study of theoretical and analytical mechanics. The information about the distance learning system is given, the educational and methodical complex (CMC) on theo-

retical and analytical mechanics is described, the possible technologies and the existing experience of using CMC in the educational process are considered.

The presented course of lectures should be considered as continuation of work on development and creation of methodical maintenance of a course of theoretical and analytical mechanics in the conditions of a permanent tendency to reduction of volumes of lecture and practical occupations. The presentation of theoretical and practical material is accompanied by a wide range of graphic and video interpretations and does not require the development and understanding of knowledge of special sections of higher mathematics. To install the course, you need to download a DVD image (in \*.format.iso), unpack the image into a separate folder or use free programs that work with DVD images (Windows, Daemon Tools, etc.). It is possible to work with individual files that have the extension "\*.ppsx".

There is a special file "Empty.ppsx", which contains 10 blank slides and is designed for operational classroom lessons, the theme of which is not in this course. The following software is required to work with the course: presentation file viewer compatible with Microsoft Office 2007, 2010, 2013 and above; video file viewer \*.avi, \*.mp4.

When teachers conduct classroom classes, it is necessary to have a specialized audience equipped with a conventional personal computer with an active electronic Board. It is possible to organize work in a local network.

**Keywords:** *theoretical and analytical mechanics, distance learning, educational and methodical complex, mathematically-oriented environment, Mathcad package.*

## **Контрольно-обучающие программы по теоретической и аналитической механике**

В.Д. Бертяев<sup>1</sup>, В.С. Ручинский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Тульский государственный университет, Тула, Россия

<sup>2</sup>Московский авиационный институт, Москва, Россия

E-mail: vit\_59@mail.ru, 2svr@mail.ru

В докладе рассмотрены контрольно-обучающие программы по статике и кинематике: назначение, состав методического обеспечения, особенности работы с программами.

В режиме обучения в отличие от режима контроля программа контролирует действия студента по решению задач, не оценивая их в баллах. При контроле составляемых уравнений выдаются сообщения об ошибках с указанием слагаемых, в которых они допущены.

Расстановка реакций связей и замена распределенной нагрузки равнодействующей силой осуществляется с помощью специальных меню. Количество попыток составления уравнений равновесия не ограничено. Следующий вопрос предлагается студенту только в случае правильного ответа на предыдущий. «Сборка» уравнений осуществляется с помощью меню силовых и геометрических параметров, элементами которого являются активные силы, реакции связей, размеры конструкции, тригонометрические функции заданных углов, знаки арифметических действий и т. п. Порядок сборки уравнений равновесия не влияет на процесс обучения и результат контроля. При работе в режиме обучения имеется возможность вызвать для решения задачу любого типа.

В первом разделе диалог пользователя с компьютером осуществляется в форме «вопрос — ответ». Во втором разделе студент самостоятельно, без подсказки ЭВМ, строит алгоритм решения задачи. Правильность ввода аналитических выражений и графических построений непрерывно контролируется ЭВМ. В третьем разделе взаимодействие контрольно-обучающей программы со студентом происходит в более гибкой форме: студент самостоятельно выбирает порядок решения задачи с помощью меню, составленного из блоков алгоритма, и некоторых вспомогательных меню. Только иногда диалог принимает форму вопроса и ответа. В последнем случае вопросы носят вспомогательный характер и служат успешному «путешествию» студента по программе.

Обширный выбор задач, а также автоматизация диалога «пользователь — компьютер» позволяют студентам использовать электронный задачник на практических занятиях в дисплейных классах и читальных залах.

**Ключевые слова:** *контрольно-обучающие программы, теоретическая и аналитическая механика, электронный задачник-тренажер, автоматизированные учебные курсы, режимы обучения и контроля, меню силовых и геометрических параметров.*

## **Control and training programs on theoretical and analytical mechanics**

V.D. Bertyaev<sup>1</sup>, V.S. Ruchinskiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tula State University, Tula, Russia,

<sup>2</sup>Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

E-mail: vit\_59@mail.ru, 2svr@mail.ru

In the report control and training programs on statics and kinematics are considered: appointment, structure of methodical maintenance, features of work with programs.

In learning mode, in contrast to the control mode, the program monitors the student's actions to solve problems, not evaluating them in points.

At control of the made equations error messages with indication of terms in which they are admitted are given. Placement of reactions of communications and replacement of the distributed loading by resultant force is carried out by means of special menus. The number of attempts to compile equilibrium equations is not limited. The next question is offered to the student only if the previous one is answered correctly. "Assembly" of equations is carried out by means of the menu of force and geometrical parameters which elements are active forces, reactions of communications, the sizes of a design, trigonometric functions of the set angles, signs of arithmetical actions, etc. the Order of Assembly of equations of equilibrium does not influence learning process and result of control. When working in training mode, it is possible to call a task of any type to solve it.

In the first section, the user's dialogue with the computer is carried out in the form of a "question-answer". In the second section, the student independently, without prompting the computer, builds an algorithm for solving the problem. Correctness of input of analytical expressions and graphic constructions is continuously controlled by the computer. In the third section, the interaction of the control and training program with the student takes place in a more flexible form: the student independently chooses the order of solving the problem using a menu composed of algorithm blocks and some auxiliary menus. Only sometimes the dialogue takes the form of a question and answer. In the latter case, the questions are auxiliary in nature and serve the successful "journey" of the student through the program.

A wide range of tasks, as well as the automation of the dialogue "user-computer" allow students to use the electronic task book in practical classes in display classes and in reading rooms.

**Keywords:** *control and training programs, theoretical and analytical mechanics, electronic task book-simulator, automated training courses, training and control modes, menu of power and geometric parameters.*

## **Разработка нейросетевой модели для управления процессом дозирования сыпучих масс**

М.М. Благовещенская, В.Г. Благовещенский, А.Н. Петряков

МГУПП, Москва, Россия

E-mail: mmb@mgupp.ru

Рассматривается и анализируется актуальная задача автоматического управления процессом дозирования сыпучих масс на основе разработки математической модели с применением аппарата искусственных нейронных сетей. Целью работы является получение рекомендаций по использованию нейросетевой модели с ПИД-контроллером.

В статье обоснована перспективность использования нейросетевых технологий при разработке АСУ-процессов дозирования мелкодисперсных сыпучих масс для получения необходимого качества выпускаемой продукции. При этом появляется задача разработки математических моделей, обеспечивающих заданный алгоритм производства. В связи с этим в работе представляются комплексные исследования, направленные на автоматизацию управления уровнем при дозировании сыпучих масс с применением искусственных нейронных сетей; разработку виртуального датчика уровня этих сыпучих масс на основе нейросетевой модели; исследование возможности интеграции такого датчика в систему управления технологическим процессом дозирования. Разработка современных нейросетевых моделей позволяет построить эффективную систему регулирования и управления технологическими процессами дозирования сыпучих масс.

**Ключевые слова:** математическая модель, автоматическое управление, искусственные нейронные сети, процесс дозирования, сыпучие массы.

## **Development of a neural network model to control the process of dosing bulk masses**

M.M. Blagoveshchenskaya, V.G Blagoveshchenskiy, A.N.Petryakov

MGUPP, Moscow, Russia  
E-mail: mmb@mgupp.ru

This article discusses and analyzes the actual problem of automatic control of the process of dosing of bulk masses on the basis of the development of a mathematical model using the apparatus of artificial neural networks. The aim of the work is to obtain recommendations on the use of a neural network model with a PID controller. The article substantiates the prospects for the use of neural network technologies in the development of ACS by the process of dosing of bulk masses to obtain the necessary quality of products. At the same time there is a problem of development of the mathematical models providing the set course of production. In this connection, the article presents comprehensive studies aimed at automating the level control when dosing bulk with the use of artificial neural networks; the development of a virtual level sensor of these bulk masses on the basis of a neural network model; the study of the possibility of integrating such a sensor into the control system of the technological process of dosing. The development of modern neural network models allows to build an effective system of regulation and control of technological processes of dosing of bulk masses.

**Keywords:** mathematical model, automatic control, artificial neural networks, dosing process, bulk masses.

## Использование имитационного моделирования для идентификации состояния промышленного предприятия

И.Г. Благовещенский<sup>1,2</sup>, М.М. Благовещенская<sup>1</sup>, Е.А. Назойкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МГУПП, Москва, Россия

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: mmb@mgupp.ru

Рассматривается метод имитационного моделирования как один из наиболее эффективных методов исследования процессов и производственных систем. Имитационная модель отражает большое число параметров, логику и закономерности поведения моделируемого объекта. В работе рассматривается проблема идентификации состояния промышленных предприятий на основе технологий имитационного моделирования. Метод имитационного моделирования позволяет спроектировать модель изучаемой системы для проведения экспериментов с целью получения информации об этой системе. Показана необходимость широкого использования математического моделирования объектов и процессов в различных производственных процессах. Приводятся основные принципы моделирования, примеры математических моделей процессов и объектов. Описывается проблематика современных производственных процессов, исследуются способы применения компьютерного моделирования как средства формализации производственных процессов, дается описание актуальных методов имитационного моделирования и производится выбор программного обеспечения для создания подобного рода моделей. После построения имитационной модели при проведении оптимизации модели можно подобрать необходимое количество оборудования и рабочих мест для выполнения всех операций производственного процесса, определить величину транспортной партии при передаче изделий между различными рабочими местами и начальные значения межоперационных заделов.

**Ключевые слова:** мультиагентное моделирование, имитационное моделирование, управление, прогнозирование, идентификация.

## Using simulation modeling to identify the state of an industrial enterprise

I.G. Blagoveshchenskiy<sup>1,2</sup>, M.M. Blagoveshchenskaya<sup>1</sup>, E.A. Nazoikin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>MGUPP, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: mmb@mgupp.ru

This article discusses and analyzes the method of simulation as one of the most powerful and most effective methods of research processes and production systems. The simulation model reflects a large number of parameters, logic and patterns of behavior of the simulated object. The article deals with the problems of identification of the state of industrial enterprises on the basis of simulation technologies. The simulation method allows you to design a model of the studied system for experiments in order to obtain information about this system. The necessity of wide use of mathematical modeling of objects and processes in various production processes is shown. The basic principles of modeling, examples of mathematical models of processes and objects are given. The problems of modern production processes are described, the ways of using computer modeling as a means of formalization of production processes are investigated, the description of actual methods of simulation modeling is given and the choice of software for creating such models is made. After building the simulation model, when optimizing the model, it is possible to select the necessary number of equipment and jobs to perform all operations of the production process, determine the value of the transport batch when transferring products between different workplaces and the initial values of the interoperative backlog.

**Keywords:** *multi-agent modeling, modeling, simulation modeling, anylogic, food enterprises, models, management, forecasting, identification.*

## Бафтинг как нелинейный околорезонансный процесс развития малых колебаний

А.Н. Богданов

НИИ механики МГУ, Москва, Россия

E-mail: bogdanov@imec.msu.ru

Развитие малых колебаний в условиях, близких к резонансным, представляет собой серьезную опасность для механических устройств, в первую очередь для летательных аппаратов [1]. В аэродинамике хорошо известен бафтинг, представляющий собой нестационарные колебания с ударными волнами у поверхности аппарата. Связь околорезо-



нансных колебаний и бафтинга в настоящее время относится к числу гипотез, не разработанных экспериментально и теоретически.

В настоящем докладе предложена математическая модель около-резонансных колебаний, в том числе и для трансзвукового режима движения летательного аппарата, аналогичная модели нелинейных околорезонансных колебаний газа в канале [2].

*Работа выполнена в соответствии с планом исследований НИИ механики МГУ при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 16-29-01092-офи\_м, 18-01-00793-а).*

### Литература

1. Ганиев Р.Ф. Нелинейные резонансы и катастрофы. Надежность, безопасность и бесшумность. Москва: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2013. 592 с.
2. Богданов А.Н. Моделирование вынужденных релаксационных колебаний газа в канале переменного сечения // Мат. моделирование. 1994. Т. 6, № 1. С. 69–85.

## **Buffeting as a near-resonance non-linear process of the small disturbances development**

A.N. Bogdanov

Institute of Mechanics of Lomonosov MSU, Moscow, Russia  
E-mail: bogdanov@imec.msu.ru

The development of small disturbances under near-resonance conditions has a significant danger to mechanical machines behavior, first of all to a flight failure [1]. In aerodynamic theory a buffeting is well-known as process of irregular oscillations with the shock waves at the surface of aircraft. Currently the relation between near-resonance oscillations and buffeting has a status of hypothesis that is not confirmed through both experimental and theoretical investigations. This paper outlines a mathematical model of near-resonance oscillations, applying to transonic motion mode of aircraft as well. The suggested model is similar to the model of non-linear near-resonance gas oscillations in a channel [2].

*This work was carried out according with the research plan of the Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University due to financial support of the Russian Foundation for Basic Research (projects 16-29-01092-ofi\_m, 18-01-00793-a).*

### References

1. Ganiev R.F. Nonlinear resonance and disaster. Reliability, safety and *quietness*. Moscow, Regular and chaotic dynamics publishing house, 2013, 592 p. (In Russ.)
2. Bogdanov A.N. A modeling of the forced relaxation gas oscillations in a channel of periodically varying cross section. Math. Modeling, 1994, vol. 6, no. 1, pp. 69–85. (In Russ.)

## **О влиянии некоторых параметров планетарного механизма на изменение его потенциальной энергии**

Н.И. Бондаренко, К.Б. Обносков, А.В. Паншина

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: fn3@bmstu.ru

В работе рассматривается модель механизма планетарного типа с одной степенью свободы, расположенного в вертикальной плоскости. Подобный механизм может являться частью планетарных редукторов, бортовых планетарных передач тяжелых автомобилей. С помощью нелинейной функции потенциальной энергии определяются положения устойчивого и неустойчивого равновесия рассматриваемого механизма. Выявлены особенности изменения потенциальной энергии в зависимости от характеристик механизма, в том числе от того, является ли радиус сателлита числом рациональным, иррациональным или трансцендентным.

**Ключевые слова:** *планетарный механизм, колебания, положение равновесия, потенциальная энергия.*

## **On the influence of some parameters of the planetary mechanism on the change in its potential energy**

N.I. Bondarenko, K.B. Obnosov, A.V. Panshina

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: fn3@bmstu.ru

The paper considers a model of a planetary type mechanism with one degree of freedom located in a vertical plane. A similar mechanism can be part of planetary gearboxes, final planetary gears of heavy vehicles. Using the nonlinear function of potential energy, the positions of stable and unstable equilibrium of the mechanism under consideration are determined. The features of changes in potential energy depending on the characteristics of the mechanism, including whether the radius of the satellite is a rational, irrational, or transcendental number, are revealed.

**Keywords:** *planetary mechanism, vibrations, equilibrium, potential energy.*

## Гравитационный потенциал планеты, моделируемой вязкоупругим шаром

А.С. Борец, А.В. Шатина

МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия  
E-mail: shatina\_av@mail.ru

Работа посвящена исследованию гравитационного потенциала планеты, движущейся в гравитационном поле притягивающего центра и спутника. Планета моделируется однородным изотропным вязкоупругим шаром. Спутник и притягивающий центр моделируются материальными точками. Система «планета–спутник» движется относительно общего центра масс, который в свою очередь совершает движение по кеплеровской орбите относительно неподвижного притягивающего центра. На основе решения квазистатической задачи теории упругости в рассматриваемой задаче получена формула для вычисления гравитационного потенциала планеты, а также вычислен гравитационный потенциал Земли с учетом твердотельных приливных эффектов от Луны и Солнца во внешней точке и в точке на ее поверхности. Построены графики, показывающие зависимость гравитационного потенциала Земли от времени. Традиционно для определения гравитационного поля Земли используется модель абсолютно твердого тела, а учет приливных деформаций отражается в виде малых поправок к коэффициентам модели геопотенциала. Актуальность темы исследования связана с высокоточным прогнозированием движения искусственных спутников Земли, высокоточным измерением гравитационного поля Земли.

**Ключевые слова:** гравитационный потенциал, вязкоупругая планета, приливы.

## Gravitational potential of a planet modeled by a viscoelastic sphere

A.S. Borets, A.V. Shatina

MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia  
E-mail: shatina\_av@mail.ru

The work is devoted to the study of the gravitational potential of a planet moving in the gravitational field of an attracting center and satellite. The planet is modeled by a homogeneous isotropic viscoelastic sphere. The satellite and the attracting center are modeled by material points. The planet-satellite system moves relative to the common center of mass, which in turn performs motion in the Keplerian orbit relative to the stationary attracting center. Based on the solution of the quasistatic

problem of the theory of elasticity, the formula obtained is used to calculate the planet's gravitational potential, and the Earth's gravitational potential is calculated taking into account the solid-state tidal effects from the Moon and the Sun at an external point and at a point on its surface. Charts are constructed showing the time dependence of the Earth's gravitational potential. Traditionally, to determine the Earth's gravitational field, a model of an absolutely rigid body is used, and account of tidal deformations is reflected in the form of small corrections to the coefficients of the geopotential model. The relevance of the research topic is associated with high-precision prediction of the motion of artificial Earth satellites, with high-precision measurement of the Earth's gravitational field.

**Keywords:** *gravitational potential, viscoelastic planet, tides.*

### **Моделирование динамики многозвенной модели с переменной длиной**

А.В. Борисов<sup>1</sup>, И.Е. Каспирович<sup>2</sup>, Р.Г. Мухарлямов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Филиал ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», Смоленск, Россия

<sup>2</sup> РУДН, Москва, Россия

E-mail: borisowandrej@yandex.ru, kaspirovich.ivan@mail.ru, robgar@mail.ru

В работе моделируется динамика многозвенной системы с переменной длиной. Каждый стержень модели представляется в виде суммы основного массивного элемента с постоянной длиной и безмассового придатка с переменной. Установка режима движения системы позволяет наложить набор механических связей. Управляющие воздействия, определяющие длину стержня, ищутся в виде обобщенных сил реакций связей с учетом метода стабилизации Баумгарте.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-00261).*

**Ключевые слова:** *стабилизация связей, многозвенная система, управляющие воздействия.*

## **Modeling the dynamics of a multi-link model with variable length**

A.V. Borisov<sup>1</sup>, I.E. Kaspirovich<sup>2</sup>, R.G. Mukharlyamov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Branch of National Research University «Moscow Power Engineering Institute» in  
Smolensk, Smolensk, Russia

<sup>2</sup>RUDN University, Russia

E-mail: borisowandrej@yandex.ru, kaspirovich.ivan@mail.ru, robgar@mail.ru

In this paper the dynamics of a multi-link model with variable length is considered. Each rod of the model can be represented as a sum of a massive element with a fixed length value and a massless part with variable length. By setting mod of the motion we can restrict our system with a set of mechanical constraints. So the control forces that determine the length of the rods can be found as generalized constraint reactions with regard for Baumgarte stabilization method.

*This work is supported by RFBR, project No. 19-08-00261.*

**Keywords:** *constraint stabilization, multi-link model, control forces.*

## **Потенциальная энергия силы натяжения гибкой нити**

А.В. Брюквин, О.Ю. Брюквина

Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Мытищи, Россия

E-mail: fn3@bmstu.ru

В работе анализируются энергетические характеристики нити при ее продольно-поперечных колебаниях. Используя вариационный принцип, проанализирована зависимость сил, действующих на элемент нити. Предложенный подход позволяет описывать силы, действующие на гибкую нить при любых зависимостях потенциальной энергии от растяжений.

**Ключевые слова:** *гибкая нить, колебания, потенциальная энергия.*

## **О винтовом установившемся движении тела при снижении в сопротивляющейся среде**

М.И. Бугрова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: MaryBugrova@yandex.ru

Рассматривается падение тяжелого осесимметричного тела в сопротивляющейся среде. Воздействие среды формируется на основе квазистатической модели. Предполагается, что воздействие среды

сводится к равнодействующей силе, лежащей в плоскости угла атаки тела, и диссипативному моменту относительно его оси симметрии. При такой модели воздействия среды всегда существует равномерное снижение тела с вертикально ориентированной осью симметрии. При определенных условиях возможно винтовое установившееся движение, при котором ось симметрии тела описывает круговой конус, а точка приложения равнодействующей силы воздействия среды снижается равномерно по вертикали. В работе рассматриваются вопросы устойчивости винтового движения.

**Ключевые слова:** *осесимметричное тело, сопротивляющаяся среда, винтовое движение, устойчивость.*

## **On the steady helical descending motion of a body in a resisting medium**

M.I. Bugrova

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: MaryBugrova@yandex.ru

The fall of a heavy dynamically symmetrical body in a resisting medium is considered. The impact of the environment is formed on the basis of a quasi-static model. It is assumed that the influence of the medium can be represented as the resultant force lying in the plane of the angle of attack of the body and the dissipative moment of symmetry axis. With this model of environmental impact, there is always a uniform descent of the body with a vertically oriented axis of symmetry. Under certain conditions, a helical motion is possible, in which the axis of symmetry of the body makes a circular cone, and the point of application of the resultant force decreases uniformly vertically. The paper considers the issues of stability of a helical movement of the body in a resisting medium.

**Keywords:** *dynamically symmetrical body, resisting medium, helical motion, stability.*

## **Применение метода неопределенных частот для анализа двухпланетной задачи**

В.М. Буданов

НИИ механики МГУ, Москва, Россия  
E-mail: vlbudanov@gmail.com

Рассматривается задача о движении вокруг массивного центрального тела (звезды) двух других тел (планет) со сравнимыми массами, которые существенно меньше массы центрального тела. Предполага-

ется, что движение планет происходит в одной плоскости по орбитам, близким к круговым. Общепринятым подходом для аналитического анализа такой системы является описание орбит как кеплеровских, но с оскулирующими элементами. При этом используется связь между средним движением и величиной большой полуоси в соответствии с третьим законом Кеплера на основании теоремы Лапласа — Лагранжа о неизменности больших полуосей и средних движений.

В настоящей работе движение планет строится непосредственно в полярных координатах с применением метода неопределенных частот, предложенного автором и являющегося модификацией метода последовательных приближений. Получено первое приближение, представляющее собой для каждой планеты сумму равномерного кругового движения и малых квазипериодических добавок. Последние представляют собой сумму периодических компонент, периоды которых равны периодам круговых движений обоих тел, а также их суммам и разностям. При этом периоды круговых движений изменяются по сравнению с тем, что дает третий закон Кеплера: период внутренней планеты увеличивается, а внешней — уменьшается. Второй особенностью построенного приближенного решения является отсутствие вековых возмущений.

Полученные аналитические выводы подтверждаются результатами численного интегрирования, а также проверкой выполнения известных первых интегралов, в частности интеграла площадей. Предложенная методика технически проще общепринятой и может служить альтернативой при решении конкретных задач небесной механики.

**Ключевые слова:** *двухпланетная задача, метод последовательных приближений.*

## **Application of the undefined frequency method for the analysis of a two-planet problem**

V. M. Budanov

Institute of Mechanics of Lomonosov MSU, Moscow, Russia  
E-mail: vlbudanov@gmail.com

The problem of motion of two bodies (planets) with comparable masses around a massive central body (star) is considered in proposition that planet masses are significantly less than the mass of the central body. It is assumed that the movement of the planets occurs in the same plane and orbits are close to circular. A common approach for the analytical analysis of such a system is to describe the orbits as Keplerian, but with osculating elements. The connection between the mean motion and

the magnitude of the large semi-axis is used in accordance with Kepler's third law on the basis of the Laplace — Lagrange theorem on the immutability of large semi-axes and average motions.

In this paper, the motion of the planets is constructed directly in polar coordinates using the method of undefined frequencies proposed by the author, which is a modification of the method of successive approximations. The first approximation is obtained, which is the sum of uniform circular motion and small quasi-periodic terms for each planet. The latter are the sum of periodic components whose periods are equal to the periods of circular motions of both bodies, as well as their sums and differences. Herewith the periods of circular motions change in comparison with what Kepler's third law gives: the period of the inner planet increases, and the outer one decreases. The second feature of the constructed approximate solution is the absence of secular perturbations.

The obtained analytical conclusions are confirmed by the results of numerical integration, as well as by checking the performance of the known first integrals, in particular, the area integral. The proposed technique is technically simpler than the conventional one and can serve as an alternative for solving specific problems of celestial mechanics.

**Keywords:** *two-planet problem, method of successive approximations.*

## **Динамика ракет-носителей в техническом университете**

В.А. Бужинский

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: buzhinsky.valery@yandex.ru

Становление и развитие курса «Динамика ракет-носителей» в технических университетах связано с научно-педагогической деятельностью академика К.С. Колесникова. Основные технические проблемы динамики ракет-носителей и инженерные методы их решения отражены им в учебнике [1], первое издание которого вышло в 1980 г., а второе, с незначительными дополнениями, — в 2003 г. Этот учебник получил высокую оценку и используется инженерами и учеными ракетно-космической промышленности.

Динамические свойства жидкостных ракет определяются взаимодействием конструкций с жидким топливом. Результаты исследования движения тела с жидкостью, опубликованные великим русским ученым Н.Е. Жуковским в 1885 г. [2] и не имевшие в то время каких-либо практических приложений, в настоящее время применяются в различных областях техники. Постановка краевых задач осталась неизменной, а введенные им присоединенные моменты инерции жидкости необходимы для определения моментов инерции ракет-носителей и космических аппаратов.



Методы, разработанные Н.Е. Жуковским в проведенном исследовании аварий на московском водопроводе, впервые напечатанные в «Бюллетенях Политехнического общества» в 1899 г. [3], практически без изменений переносятся на анализ движения жидкости в топливных магистралях ракет-носителей. В частности, для предотвращения разрывов водопровода от гидравлических ударов была предложена установка «воздушного колпака». Газовый демпфер, имеющий аналогичные свойства, устанавливается в топливных магистралях ракет-носителей и является средством предотвращения их продольной неустойчивости (РОГО).

Исследования Н.Е. Жуковского получили развитие в работах отечественных и зарубежных ученых. Современное состояние исследований по динамике конструкций с жидкостью, включающее полнейший обзор громадного числа научных публикаций, подвел Рауф [4]. В связи с развитием вычислительной техники и применением метода конечных элементов изменились методы расчета и анализа динамических характеристик конструкций жидкостью. Современное изложение теории механических колебаний, ориентированное на применение этих методов, представили Жерадин и Риксен [5]. Насколько возможно, эти изменения принимаются во внимание в лекциях [6], которые читаются студентам МФТИ и МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Ключевые слова:** динамика ракет-носителей, механические колебания, конструкции с жидкостью.

### Литература

1. Колесников К.С. Динамика ракет. Москва: Машиностроение, 2003. 519 с.
2. Жуковский Н.Е. О движении твердого тела, имеющего полости, заполненные однородной капельной жидкостью. С.-Петербург, 1885. 137 с. // Собр. соч., т. II, Москва: Гостехиздат, 1948.
3. Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. М.–Л.: ГИТТЛ, 1949. 105 с.
4. Ibrahim R.A. Liquid Sloshing Dynamics. Theory and Applications. Cambridge University Press, 2005. 948 p.
5. Geradin M., Rixen D.J. Mechanical Vibrations. Theory and Application to Structural Dynamics. Third edition. Wiley, 2015. 598 p.
6. Бужинский В.А. Динамика и устойчивость движения ракет. Королёв: Изд-во ЦНИИмаш, 2017. 273 с.

## Dynamics of launch vehicles at the technical university

V.A. Bouzhinskii

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: buzhinsky.valery@yandex.ru

Formation and development of course “Dynamics of Launch Vehicles” at the technical universities is connected with the scientific-pedagogical activity of the academician of K.S. Kolesnikov. The basic

technical problems of dynamics of launch vehicles and the engineering methods of their solution are reflected by him in the textbook [1], first edition of which was published in 1980, and the second, with the insignificant additions, in 2003. This textbook obtained appreciation and he is used by engineers and scientists of rocket-space industry.

The dynamic properties of liquid rockets are determined by the interaction of structures with liquid fuel. The results of the study of the motion of the body with liquid, published by the great Russian scientist N.E. Zhukovsky in 1885 [2] and did not have any practical applications at the time, are now used in various fields of technology. The formulation of boundary value problems remained unchanged, and introduced by him the attached moments of inertia of the liquid are necessary for determining the moments of inertia of launch vehicle and spacecraft.

The methods developed by N. E. Zhukovsky in the study of accidents on the Moscow water supply, first published in the "Bulletins of the Polytechnic society" in 1899 [3], almost unchanged transferred to the analysis of fluid motion in the fuel lines of launch vehicle. In particular, to prevent water breaks from hydraulic shocks was proposed the installation of an "air cap". A gas damper having similar properties is installed in the fuel lines of launch vehicles and is a means of preventing their longitudinal instability (POGO).

Zhukovsky's research has been developed in the works of domestic and foreign scientists. The current state of research on the dynamics of structures with liquid, including a complete review of a huge number of scientific publications, summed up Raouf A. Ibrahim [4]. In connection with the development of computer technology and the application of the finite element method, the methods of calculation and analysis of dynamic characteristics of structures with liquid have changed. The modern exposition of the theory of mechanical vibrations, focused on the application of these methods, was presented by Michel Geradin and Daniel J. Rixen [5]. As far as possible, these changes are taken into account in the lectures [6], which are read to students of MIPT and Bauman MSTU.

**Keywords:** *dynamics of launch vehicle, mechanical vibrations, liquid structures.*

## References

1. Kolesnikov K.S. *Dynamics of rockets*. Moscow, Mashinostroenie, 2003. 519 p.
2. Zhukovsky N.E. *On the motion of a solid body having cavities filled with a homogeneous droplet liquid*. St. Petersburg, 1885. 137 p. Collected works, vol. II, Moscow, Gostekhizdat, 1948.
3. Zhukovsky N.E. *On hydraulic shock in water pipes*. Moscow–Leningrad, GITTL, 1949. 105 p.
4. Ibrahim R.A. *Liquid Sloshing Dynamics. Theory and Applications*. Cambridge University Press, 2005. 948 p.

5. Geradin M., Rixen D.J. *Mechanical Vibrations. Theory and Application to Structural Dynamics*. Third edition. Wiley, 2015. 598 p.
6. Buzhinskii V.A. *Dynamics and Stability of Launch Vehicles motion*. Korolev, TsNIIMash Publ., 2017. 273 p.

## **Динамический анализ кривошипно-ползунного механизма с пружиной, применяющегося в моечной машине нового типа для овощей и фруктов**

В.Ф. Буй<sup>1</sup>, С.С. Гаврюшин<sup>1</sup>, В.Б. Фунг<sup>2</sup>, Х.М. Данг<sup>3</sup>, В.С. Прокопов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup> Технический университет имени Ле Куй Дона, Ханой, Вьетнам

<sup>3</sup> Индустриальный университет Хошимина, Хошимин, Вьетнам  
E-mail: phuongbv1991@gmail.com, vprokopov@bmsu.ru

Кривошипно-ползунный механизм (КПМ) широко применяется во многих областях машиностроения. Одной из важных проблем, связанных с применением КПМ, является возникновение динамических реакций, вызывающих вибрации системы и снижающих усталостную прочность деталей. Основным способом снижения влияния сил инерции и динамических реакций на КПМ является использование противовесов. Однако данный способ приводит к увеличению массы и габаритов конструкции, поэтому во многих случаях он неприменим.

С целью снижения динамических реакций в парах в данной работе предлагается использование модифицированного механизма, комбинирующего КПМ с системой пружин. Динамические и кинематические характеристики системы КПМ-пружины под действием внешних сил были изучены с помощью аналитических выражений. На основании таких выражений было исследовано влияние жесткости пружины на требуемый вращающий момент мотора и реакции в парах КПМ. Результаты показали, что пружина в КПМ позволяет уменьшить не только реакции, но также необходимую мощность мотора — другими словами, повысить энергоэффективность. Система КПМ-пружины эффективно применяется при создании моечной машины нового типа для овощей и фруктов. Успешно решена задача оптимального синтеза с двумя критериями, такими как динамические реакции и требуемая мощность. Полученные аналитические результаты хорошо согласуются с численными результатами NX Motion Simulation-RecurDyn<sup>®</sup>.

**Ключевые слова:** кривошипно-ползунный механизм, пружины, динамический анализ, синтез механизмов, оптимизация.

## **Dynamic analysis of slider-crank mechanism connected spring system and application for an innovative fruit & vegetable washer**

V.P. Bui<sup>1</sup>, S.S. Gavriushin<sup>1</sup>, V.B. Phung<sup>2</sup>, H.M. Dang<sup>3</sup>, V.S. Prokopov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Le Quy Don Technical University, Ha Noi, Viet Nam

<sup>3</sup>Industrial University of Ho Chi Minh, Ho Chi Minh, Viet Nam

E-mail: phuongbv1991@gmail.com, vprokopov@bmstu.ru

The slider-crank mechanism (SCM) has played an important role in machine design and already implemented in many devices and appliances. One of the principal issues of this mechanism is dynamic reactions, causing system vibrations and reducing fatigue strength of the parts. The main approach to diminish the inertial force effect on SCM is to use counterweights. However, the drawback of this approach is the increase in structure mass and dimensions, the resultant mechanical system is often bulky; hence in many cases it is not feasible for machine design.

In this work, the approach to reduce dynamic reactions is to use combination of spring system with SCM. The dynamic and kinematic characteristics of the spring-SCM with spring under an external force were analyzed using explicit expressions. The effect of spring stiffness on crank torque and reaction forces at joints was examined. The results showed that spring in SCM reduce not only reaction forces at joints, but also decrease required power to crank drive motor or less energy consumption. The spring-SCM was effectively used in an innovative fruit and vegetable washer. The optimal synthesis problem of this appliance with two criteria such as reaction forces and required power was solved successfully. The analytical results verified with the numerical ones obtained using from NX Motion Simulation-RecurDyn<sup>®</sup>.

**Keywords:** *slider-crank mechanism, spring, dynamic analysis, mechanism synthesis, optimization.*

## **Нестационарные режимы генерации внутренних и поверхностных гравитационных волн**

В.В. Булатов, Ю.В. Владимиров

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

E-mail: internalwave@mail.ru

Целью работы является математическое моделирование нестационарных режимов генерации полей внутренних и поверхностных гравитационных волн, возбуждаемых нестационарными движущимися

источниками возмущений. Изучены основные особенности фазовых структур и волновых картин возбуждаемых волновых полей в зависимости от различных параметров генерации. Результаты математического моделирования нестационарных режимов генерации показывают, что дальние волновые поля от нестационарных источников возмущений при определенных режимах генерации представляют собой гибридную систему волн двух типов: кольцевых (поперечных) и клиновидных (продольных). Нестационарность источника возмущений приводит к появлению не только кольцевых волн, расходящихся непосредственно от источника, но также к генерации гибридных волновых возмущений, распространяющихся от источника вверх по потоку. Качественная картина волновых полей от нестационарного источника существенно усложняется по сравнению со случаем генерации волн движущимся стационарным источником, когда в фиксированную точку наблюдения последовательно приходят волновые фронты отдельных клиновидных (продольных) мод. Расчеты показывают, что при определенных параметрах генерации в фиксированную точку наблюдения могут приходиться вначале кольцевые (поперечные) волны. Волновые моды, первые достигающие фиксированной точки наблюдения, определяются параметрами генерации и стратификацией среды. Для больших номеров мод угол полураствора волнового клина уменьшается с номером моды так же, как и для случаев стационарных режимов генерации. Полученные результаты математического моделирования полей внутренних и поверхностных гравитационных волн дают возможность эффективно анализировать основные амплитудно-фазовые характеристики возбуждаемых волновых полей и, кроме того, качественно исследовать полученные решения, что важно для правильной постановки более сложных математических моделей волновой динамики реальных стратифицированных сред. Подобного рода волновые картины могут наблюдаться при дистанционном зондировании, наблюдении и измерениях внутренних и поверхностных гравитационных волн, возбуждаемых различными источниками возмущений, в природных (океан, атмосфера Земли) и искусственных стратифицированных средах. Помимо фундаментального интереса построенные математические модели представляют значительную ценность для практики, поскольку позволяют решать задачи моделирования волновых гидрофизических полей в широком классе приложений.

**Ключевые слова:** *внутренние и поверхностные гравитационные волны, стратифицированная среда, волновая динамика, асимптотики.*

## Non-stationary generation regimes of surface and internal gravity waves

V.V. Bulatov, Yu.V. Vladimirov

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia  
E-mail: internalwave@mail.ru

The aim of the work is mathematical modeling of non-stationary modes of generation of fields of internal and surface gravity waves excited by non-stationary moving sources of disturbances. The main features of phase structures and wave patterns of excited wave fields are studied depending on various generation parameters. The results of mathematical modeling of unsteady generation modes show that distant wave fields from unsteady sources of disturbances at certain generation modes are a hybrid system of two types of waves: ring (transverse) and wedge-shaped (longitudinal). The non-stationarity of the source of disturbances leads to the appearance of not only ring waves diverging in directly from the source, but also to the generation of hybrid wave disturbances propagating from the source upstream. The qualitative picture of wave fields from an unsteady source is significantly complicated compared with the case of wave generation by a moving stationary source, when the wave fronts of individual wedge-shaped (longitudinal) modes arrive at a fixed observation point. Calculations show that for certain generation parameters, ring (transverse) waves can initially arrive at a fixed observation point. Wave modes, the first reaching a fixed observation point, are determined by the generation parameters and stratification of the medium. For large mode numbers, the half-wave angle of the wave wedge decreases with the mode number in the same way as for the cases of stationary generation modes. The results of mathematical modeling of the fields of internal and surface gravity waves make it possible to efficiently analyze the main amplitude-phase characteristics of the excited wave fields, and, in addition, to qualitatively investigate the solutions obtained, which is important for the correct formulation of more complex mathematical models of wave dynamics of real stratified media. Such kind of wave patterns can be observed during remote sensing, observation and measurements of internal and surface gravitational waves excited by various sources of disturbances in natural (ocean, Earth's atmosphere) and artificial stratified media. In addition to the fundamental interest, the constructed mathematical models are of considerable value for practice, since they make it possible to solve the problems of modeling wave hydro-physical fields in a wide class of applications.

**Keywords:** *surface and internal gravity waves, stratified medium, wave dynamics, asymptotics.*

## **И. Ньютон и А.Н. Крылов: аэродинамическая задача**

В.И. Ванько

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: vvanko@mail.ru

Доклад посвящен двум юбилейным датам 2018 года: 375-й годовщине со дня рождения И. Ньютона и 155-й годовщине А.Н. Крылова. В 1687 г. вышел в свет (полный текст — три книги) исторический труд сэра Исаака Ньютона «Математические начала натуральной философии». В России книга впервые была опубликована в 1915–1916 гг. в «Известиях Николаевской морской академии» в переводе с латыни «с пояснениями и примечаниями Флота Генерала А.Н. Крылова, заслуженного профессора академии, ординарного академика Императорской академии наук» [1].

В разделе 7 (книга II) «О движении жидкостей и сопротивлении брошенных тел» Ньютон решает задачу о сопротивлении движению шара и длинного цилиндра равных диаметров в «редкой среде» (модель идеального газа или слабо сопротивляющейся жидкости), затем исследует движение усеченного конуса в той же среде и ставит задачу о нахождении формы тела вращения, испытывающего наименьшее лобовое сопротивление при своем движении.

Решение поставленной задачи Ньютон приводит без всяких пояснений («Я считаю, что...»), в виде некоторой пропорции, составленной из линейных элементов проектируемого тела вращения: оказалось, что носовая секция конструкции должна быть затуплена, т. е. должна иметь плоскую площадку, встречающую набегающий поток. Постановка задачи о теле вращения с наименьшим лобовым сопротивлением, естественно, зависит от закона сопротивления среды. Ньютон представлял себе «редкую среду», состоящей из неподвижных равномерно расположенных в пространстве абсолютно упругих одинаковых шариков, которые оказывают сопротивление движущемуся телу и реагируют с телом по закону «угол падения равен углу отражения». Выводятся: закон сопротивления Ньютона (пропорциональность квадрату скорости); формула силы сопротивления движущемуся в «редкой среде» телу; ставится и решается соответствующая вариационная задача. Подчеркивается выдающаяся роль акад. Крылова в современной постановке и решении задачи. Отмечается вклад отечественных ученых в разработку теории летательных аппаратов оптимальных форм [2, 3].

Излагаются результаты автора: алгебраическое исследование существования и единственности решения задачи Ньютона, выведено достаточное условие единственности решения задачи в виде ограни-

чения на выбор габаритов носовой секции; приведен пример проектирования носовой секции летательного аппарата наименьшего лобового сопротивления [4].

**Ключевые слова:** лобовое сопротивление, минимизация, тело вращения, задача Ньютона, существование и единственность решения.

### **Литература**

1. *Ньютон И.* Математические начала натуральной философии // Изв. Николаевской морской академии. Петроград, 1915, вып. IV. С. 1–276; 1916, вып. V. С. 1–344.
2. *Чёрный Г.Г.* Течения газа с большой сверхзвуковой скоростью. Москва: Физматгиз, 1959. 220 с.
3. *Крайко А.Н.* Об определении тел минимального сопротивления при использовании законов сопротивления Ньютона и Буземана // ПММ. 1963. Т. 27. Вып. 3. С. 484–495.
4. *Ванько В.И., Ермошина О.В., Кувыркин Г.Н.* Вариационное исчисление и оптимальное управление. Издание 4-е, испр. и доп. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 488 с.

## **I. Newton and A.N. Krylov: Aerodynamical Problem**

V.I. Vanko

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: vvanko@mail.ru

The report is devoted to two anniversaries of the past, 2018: the 375th anniversary of the birth of Newton and the 155th anniversary of Krylov. In 1687 the historical work of Sir Isaac Newton “Mathematical principles of natural philosophy” was published (full text — three books). In Russia, the book was first published in 1915–16 in the “Transactions of the Nikolaj I naval Academy” translated from Latin “with explanations and notes of the Fleet General A.N. Krylov, honored Professor of the academy, ordinary academician of the Imperial Academy of Sciences” [1, 2].

In section 7 (book II) “On the motion of liquids and the resistance of thrown bodies”, Newton solves the problem of resistance to the motion of a ball and a long cylinder of equal diameters in a “rare medium” (a model of an ideal gas or a weakly resisting liquid), then investigates the motion of a truncated cone in the same medium and poses the problem of finding the shape of a body of rotation experiencing the least drag during its movement.

Newton gives the solution of the problem without any explanations (“I believe that...”), in the form of some proportion composed of linear elements of the projected body of rotation: it turned out that the nose section of the structure must be blunted, i.e. must have a flat platform meeting the incoming flow. The formulation of the problem of the body of rotation with the lowest frontal resistance, of course, depends on the law of re-



sistance of the medium. Newton imagined a "rare medium" consisting of fixed uniformly spaced absolutely elastic identical balls, which resist a moving body and react with the body according to the law "the angle of incidence is equal to the angle of reflection". The following are deduced: Newton's law of resistance (proportionality to the square of velocity); the formula of the force of resistance to a body moving in a "rare medium"; the corresponding variational problem is posed and solved. The outstanding role of academician Krylov is emphasized in the modern formulation and solution of the problem. The contribution of domestic scientists to the development of the theory of aircraft of optimal forms is noted [3, 4]

The author's results are presented: algebraic study of existence and uniqueness of solutions of the Newton problem; derived a sufficient condition for the uniqueness of the problem solution in the form of restrictions on the choice of the dimensions of the forward section; an example of designing the forward section of the aircraft the least drag [5].

**Keywords:** *The Newton's problem, the least drag's body, existence and uniqueness of solution.*

#### References

1. Newton I. *Mathematical principles of natural philosophy*. Trans. of Nicolaj I Naval Academy. Petrograd, 1915, vol. IV, pp. 1–276; 1916, vol. V, pp. 1–344.
2. Krylov A.N. *The complete works*. Vol. 7: Newton I. *Mathematical principles of natural philosophy*. Translation from Latin and comments by M.-L. Krylov. USSR AS Publ., 1936, 696 p.
3. Chjorny G.G. *The gas stream with big oversound velocity*. Moscow, Fizmatgiz, 1959, 220 p.
4. Krajko A.N. About definition the minimal resistance bodies by using Newton's and Buzemann's laws. *PMM*, 1963, vol. 27, no. 3, pp 484–495.
5. Vanko V.I., Ermoshina O.V., Kuvyrkin G.N. *Variational calculus and optimal control*. Moscow, BMSTU Publ., 2018, 488 p.

## Минимальная сдвигающая сила при наличии трения скольжения

В.В. Варенцов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: av2854@columbia.edu

Рассмотрены различные методы определения минимальной сдвигающей силы, приложенной к телу, лежащему на наклонной шероховатой плоскости, основанной на геометрической и аналитической формах равновесия. Дана сравнительная характеристика рассмотренных методов.

**Ключевые слова:** *равновесие тела, реакция шероховатой поверхности, угол трения, минимальная сдвигающая сила.*

## Minimum shear force in the presence of sliding friction

V.V. Varentsov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: av2854@columbia.edu

Various methods for determining the minimum shear force applied to a body lying on an inclined rough plane based on geometric and analytical forms of equilibrium are considered. A comparative characteristic of the considered methods is given.

**Keywords:** *body balance, rough surface reaction, angle of friction, minimal shear force.*

## Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния высоко- нагруженных механических точечных соединений изделий из полимерных композиционных материалов

Ю.А. Вашуков

Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

E-mail: vashukov@ssau.ru

Объектом исследования является механическое точечное соединение композиционных материалов. Исследовалось напряженно-деформированное состояние в деталях из полимерных композитов с подкрепленными отверстиями. В процессе работы использована разработанная и проверенная на адекватность математическая модель. Определено влияние конструктивно-технологические параметров образования отверстий с подкреплением на несущую способность соединений.

**Ключевые слова:** *композиционные материалы, соединение, подкрепленное отверстие, напряженно-деформированное состояние, математическая модель.*

### Литература

1. Сироткин О.С., Гришин В.И., Литвинов В.Б. Проектирование, расчет и технология соединений авиационной техники. Москва: Машиностроение, 2006.
2. Вашуков Ю.А. Напряженно-деформированное состояние изотропной пластинки с подкрепленным отверстием при растяжении // Международная НТК «Инновационные материалы и технологии: достижения, проблемы, решения». Комсомольск-на-Амуре, 2013. С. 278–282.

## Mathematical modeling of the stress-strain state of highly loaded mechanical point joints of products from polymer composite materials

Yu.A. Vashukov

Samara National Research University, Samara, Russia

E-mail: vashukov@ssau.ru

The object of study is the mechanical point connection of composite materials. The stress-strain state was studied in parts of polymer composites with reinforced holes. In the process of work, a mathematical model developed and tested for adequacy was used. The influence of the structural and technological parameters of the formation of holes with reinforcement on the bearing capacity of the joints is determined.

**Keywords:** *composite materials, the connection, the supported aperture, the is intense-deformed condition, mathematical model.*

### References

1. Sirotkin O.S., Grishin V.I., Litvinov V.B. *Design, calculation and technology of aircraft equipment connections*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006.
2. Vashukov Yu.A. Stress-strain state of an isotropic plate with a reinforced hole under tension. *International NTK "Innovative Materials and Technologies: Achievements, Problems, Solutions"*. Komsomolsk-on-Amur, 2013, pp. 278–282.

## Определение ресурсных характеристик термоциклически нагруженной трубы с учетом кинетики основных механических свойств материала

Д.К. Веретимус, Н.К. Веретимус

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: nkvmhts@yandex.ru

В результате анализа кинетики полей накопленных повреждений смоделировано малоцикловое разрушение толстостенной трубы при термомеханическом нагружении и определены: число циклов до зарождения трещины и место ее зарождения, направление прорастания трещины и число циклов до полного разрушения трубы. Кинетические поля накопленных повреждений определялись расчетным путем, с учетом зависимости от числа циклов нагружения основных механических свойств материала трубы — стали 15Х2НМФА. Вследствие введения в расчетную модель кинетики свойств материала, в том числе переменного циклического предела текучести, даже расчетные точки трубы, находившиеся при статическом нагружении

в упругости, при циклическом нагружении переходят в пластическое состояние. В этом случае при определении кинетики напряженно-деформированного состояния ширина петли циклического упруго-пластического гистерезиса и, как следствие, величина накопленного повреждения в зонах максимальной нагруженности оказываются значительно больше, чем при постоянном циклическом пределе текучести. Таким образом, реализуется экстремальный учет накопления повреждения, что обеспечивает расчет числа циклов до образования трещины и до разрушения в более «жестких» условиях, с допущениями в безопасную сторону.

**Ключевые слова:** поля накопленных повреждений, кинетика, труба, трещина, число циклов.

### **Determination of thermocyclic loaded pipe resource characteristics taking into account the kinetics of the basic mechanical properties of the material**

D.K. Veretimus, N.K. Veretimus

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: nkvmhts@yandex.ru

The low-cycle destruction of a thick-walled pipe under thermomechanical loading was simulated and the number of cycles before the crack nucleation and the place of its nucleation, the direction of crack propagation and the number of cycles until the pipe was completely destroyed were determined as a result of the analysis of the kinetics of the fields of accumulated damages. Kinetic fields of accumulated damages were determined by calculation, taking into account the dependence on the number of loading cycles of the basic mechanical properties of the pipe material (steel 15X2NMFA). The addition of the material properties to the kinetics model, including the variable cyclic yield stress, showed that even the design points of the pipe, which were in elasticity under static loading, under cyclic loading go into the plastic state. In this case, when determining the kinetics of the stress-strain state, the width of the loop of cyclic elastic-plastic hysteresis and, as a consequence, the value of the accumulated damage in the zones of maximum loading are significantly greater than at a constant cyclic yield strength. Thus, the model provides the calculation of the number of cycles before crack formation and the number of cycles before break in more “hard” conditions, with assumptions in a safe direction.

**Keywords:** accumulated damage fields, kinetics, pipe, crack, number of cycles.

## **Исследование амплитудно-частотной характеристики нелинейных колебаний поверхности раздела двухслойной жидкости**

Вин Ко Ко, А.Н. Темнов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: win.c.latt@gmail.com, antt45@mail.ru

При проведении экспериментальных исследований малых колебаний многослойной жидкости было замечено вблизи основной резонансной частоты нелинейные отклонения поверхности раздела, переходящие затем во вращательное движение слоев жидкостей. В предлагаемом докладе предпринята попытка дать теоретическое объяснение подобного движения поверхности раздела в двухслойной жидкости. Целью рассматриваемой работы являлось получение уравнений немалых колебаний поверхности раздела двухслойной жидкости и исследование устойчивости возникающего вращательного движения жидкости в подвижном цилиндрическом баке, совершающим возвратно поступательные движения.

Для двух несжимаемых несмешивающихся идеальных жидкостей, полностью заполняющих осесимметричный сосуд произвольной формы, в предположении отсутствия вихревого движения в каждой жидкости сформулирована задача о немалых колебаниях поверхности раздела жидкостей, состоящая из уравнения Лапласа, условий непротекания на смачиваемых поверхностях, а также кинематического и динамического условий на возмущенной поверхности раздела.

После представления всех функций, входящих в кинематическое и динамическое условия с помощью формулы Тейлора через их значения на невозмущенной поверхности раздела, была получена система нелинейных уравнений для обобщенных координат  $\alpha$ ,  $\beta$ .

Исследование нелинейных уравнений показало, что в случае  $\beta = 0$  полученное нелинейное уравнение для обобщенной координаты  $\alpha$  описывает вынужденные колебания поверхности раздела жидкостей, при которых диаметр горизонтальной поверхности неподвижен и перпендикулярен плоскости возбуждения. При  $\beta \neq 0$  анализ уравнений показывает, что возможны колебания поверхности раздела около диаметра, который вращается вокруг продольной оси цилиндрической полости, вынуждая слои жидкости совершать вращательное движение. Результаты исследований нелинейных уравнений приведены в виде областей неустойчивости вынужденных колебаний и областей параметрического резонанса при различных соотношениях плотностей жидкостей.

**Ключевые слова:** нелинейные колебания, двухслойная жидкость, область неустойчивости, гидродинамические коэффициенты, резонансная частота.

### Литература

1. Win Ko Ko, Temnov A.N. Experimental and theoretical studies of oscillations of stratified fluid // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering **468** (2018) 012031.

## Investigation of amplitude-frequency characteristics of nonlinear oscillations of the interface of two-layered liquid

Win Ko Ko, A.N. Temnov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: antt45@mail.ru

When conducting experimental studies of small oscillations of a multilayer liquid [1], nonlinear deviations of the interface were observed near the main resonant frequency, then passing into the rotational motion of the layers of liquids. In the proposed report, an attempt is made to give a theoretical explanation of such a motion of the interface in a two-layer liquid. The aim of this work was to obtain the equations of considerable oscillations of the interface of two-layer liquid and to study the stability of the resulting rotational motion of the liquid in a movable cylindrical tank performing reciprocating movements.

Let two incompressible immiscible ideal liquids completely fill an axisymmetric vessel of arbitrary shape. Assuming the absence of vortex motion in each liquid, the problem of considerable oscillations of the liquid interface is formulated, consisting of the Laplace equation, non-flow conditions on the wetted surfaces, as well as kinematic and dynamic conditions on the perturbed interface. The velocity potentials of each liquid are represented as the sum of the products of the generalized coordinates  $\alpha_i(t)$  of the  $i$ -th harmonic of wave motions of liquids on the interface on the coordinate function  $B_i^{(k)}(x, y, z)$ .

For the mathematical description of the effect observed in the experiment, two basic asymmetric harmonics excited in two mutually perpendicular planes and determined by generalized coordinates  $\alpha_i = \alpha_i$  ( $i = 1, 2$ ):  $\alpha_1 = \alpha$ ,  $\alpha_2 = \beta$ , and the corresponding waveforms are taken into account.

After representing all the functions included in the kinematic and dynamic conditions using Taylor's formula through their values on the undisturbed interface, a system of nonlinear equations for generalized coordinates  $\alpha$ ,  $\beta$  was obtained.

The study of nonlinear equations showed that in the case  $\beta = 0$  of the obtained nonlinear equation for the generalized coordinate, describes the forced oscillations of the interface of liquids, in which the diameter of the horizontal surface is fixed and perpendicular to the excitation plane. When  $\beta \neq 0$ , the analysis of the equations shows that there may be oscillations of the interface near the diameter, which rotates around the longitudinal axis of the cylindrical cavity, forcing the liquid layers to make a rotational movement. The results of studies of nonlinear equations are presented in the form of regions of instability of forced oscillations and regions of parametric resonance at different ratios of the density of two layered liquids.

**Keywords:** *nonlinear oscillations, two-layered liquid, instability region, hydrodynamic coefficients, resonance frequency.*

#### Reference

1. Win Ko Ko, Temnov A.N. Experimental and theoretical studies of oscillations of stratified fluid. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 468 (2018) 012031.

### **Фундаментальные и прикладные проблемы математического моделирования и методов их анализа при решении задач весового совершенства летательных аппаратов**

Ю.И. Виноградов, А.В. Беляев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: yuvino@rambler.ru, beliaev@bmstu.ru

Достижение весового совершенства летательного аппарата (ЛА) — проблема многофакторная, многопараметрическая, и не может иметь идеального решения в теории и при создании ЛА. Решение проблемы по напряженно-деформированному состоянию имеет свою специфику. Механика твердого деформируемого тела определяет как неизбежность места концентрации напряжений в конструкции ЛА, которые определяют его прочность и, как следствие, вес. Теоретическим решением задачи при этом является математическое моделирование (дифференциальные уравнения) механики деформирования тонкостенных элементов ЛА и выбор эффективного метода анализа модели (дифференциальных уравнений) с контролируемой погрешностью при решении прикладных задач. В качестве математической модели элементов ЛА принимается теория оболочек (В.З. Власов [1], гипотезы Кирхгофа — Лява) и впервые аналитически (с контролируемой погрешностью) анализируются математические модели для класса задач, огра-

ниченного возможностью метода Фурье разделения переменных в дифференциальных уравнениях с частными производными. Определяются размеры мест концентрации напряжений и их максимальные значения. Результаты позволяют снизить коэффициент запаса прочности и, следовательно, уменьшить вес летательного аппарата [2, 3].

**Ключевые слова:** математическая модель деформирования оболочки, количественный анализ погрешности.

### Литература

1. Власов В.З. Избранные труды. В 3 т. Т. 1. Очерк научной деятельности «Общая теория оболочек». Статьи. Москва: Изд-во АН СССР, 1962. 528 с.
2. Виноградов Ю.И., Георгиевский В.П., Константинов М.В. Асимптотика Гольденвейзера при расчете на прочность сферического бака // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 3. С. 119–133. DOI: 10.18698/0236-3941-2015-3-119-133.
3. Беляев А.В., Виноградов Ю.И., Константинов М.В. О выборе математической модели сферической оболочки для расчета на прочность // МТТ. 2018. № 3. С. 105–118. = A.V. Belyaev, Yu.I. Vinogradov, M.V. Konstantinov. On the Choice of the Mathematical Model of Spherical Shell for Strength Calculation // Mechanics of Solids. 2018. Vol. 53. No. 3. Pp. 329–339. DOI: 10.7868/S057232991803011X <https://link.springer.com/article/10.3103/S0025654418070117>

## Fundamental and applied problems of mathematical modeling in the design of aerospace systems

Y.I. Vinogradov, A.V. Belyaev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: yuvino@rambler.ru, beliaev@bmstu.ru

Achieving mass perfection of the aerospace system is a multifactorial task. As a solution search area, the stress-strain state of the structural elements of the aerospace vehicle is adopted. The mathematical modeling (differential equations) of the thin-walled structural elements deformation is the theoretical solution. The possibility of using the analysis method with the control of the error of the solution is shown. The theory of shells (V.Z. Vlasov [1], Kirchhoff-Love hypotheses) is accepted as a mathematical model of thin-walled elements. For mathematical models that allow separation of variables in partial differential equations, a new analytical method for controlling the error of the solution is proposed. It's used to determine the size of stress concentration sections and their maximum values. The proposed method allows checking the strength of the aerospace thin-walled structure and assessing the possibility of reducing its mass [2, 3].

**Keywords:** mathematical model of shell deformation, quantitative error analysis.



---

**References**

1. Vlasov V.Z. *Izbrannyye trudy* [Selected Works]. In 3 vols. Vol. 1. Ocherk nauchnoy deyatelnosti "Obshchaya teoriya obolochek" [Essay on the scientific activity "General theory of shells". Articles]. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1962, 528 p.
2. Vinogradov Yu.I., Georgievskiy V.P., Konstantinov M.V. Goldenweiser Asymptotic Form for Strength Analysis of the Spherical Tank. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2015, no. 3, pp. 119–133. DOI: 10.18698/0236-3941-2015-3-119-133
3. Belyaev A.V., Vinogradov Yu.I., Konstantinov M.V. On the Choice of the Mathematical Model of Spherical Shell for Strength Calculation. *Mechanics of Solids*. 2018, vol. 53, no. 3, pp. 329–339. DOI: 10.7868/S057232991803011X (<https://link.springer.com/article/10.3103/S0025654418070117>)

**Лабораторный комплекс по теоретической механике**

В.В. Витушкин, Ю.Н. Жигулевцев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: fn3@bmstu.ru

В докладе приведены результаты проводимой на кафедре «Теоретическая механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана работы по созданию лабораторно-исследовательского комплекса по основным разделам теоретической механики и теории колебаний, отвечающего современному уровню научных исследований и ведения учебного процесса.

К настоящему времени в дополнение к большому числу существующих демонстрационных приборов создан ряд снабженных измерительными устройствами установок, позволяющих проводить лабораторные работы по изучению основных теорем и аксиом механики. Основное направление при разработке данного лабораторного комплекса заключается в создании автоматизированных модельных установок, обеспечивающих соединение математического моделирования реальных механических процессов с физическим экспериментом, с применением ЭВМ и соответствующего программного и методического обеспечения.

**Ключевые слова:** теоретическая механика, теория колебаний, лабораторные исследовательские комплексы, математическое моделирование, эксперимент.

## Laboratory complexon theoretical mechanics

V.V. Vitushkin, Yu.N. Zhigulevtsev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia,  
E-mail: fn3@bmstu.ru

The report presents the results of the work at the Department of Theoretical Mechanics, Bauman MSTU, on creation of a laboratory and research complex on the main sections of theoretical mechanics and theory of oscillations, corresponding to the modern level of scientific research and conducting the educational process. To date, in addition to the large number of existing demonstration devices, a number of measuring devices have been installed, allowing laboratory work on the study of basic theorems and axioms of mechanics. The main direction in the development of this laboratory complex is to create automated model installations that provide a connection of mathematical modeling of real mechanical processes with a physical experiment, with the use of computers and appropriate software and methodological support.

**Keywords:** *theoretical mechanics, theory of oscillations, laboratory research complexes, mathematical modeling, experiment.*

## О стабилизации двойного перевернутого маятника, установленного на качелях сисо

К.Л. Войцицкая, П.А. Кручинин, А.М. Формальский

МГУ имени М.В. Ломоносова  
E-mail: voitsitskaya96@gmail.com, pkruch@mech.math.msu.su, formal@imec.msu.ru

В работе рассматривается задача стабилизации перевернутого двойного маятника, установленного на подвижной опоре в виде пресс-папье (на качелях сисо). Управлением в системе является ограниченный по абсолютной величине момент в межзвенном шарнире маятника. Учитывается вязкое сопротивление в системе. Аналогичная задача с однозвенным маятником рассматривается в [1].

Описываемая система имеет три степени свободы и один управляющий параметр. При отсутствии управления система имеет неустойчивое положение равновесия, в котором оба звена маятника направлены вертикально вверх, а качели не наклонены. Эта система моделирует человека, который стоит на качелях сисо и стремится сохранить исходное вертикальное положение равновесия, прикладывая момент только в тазобедренных суставах. Построенное в работе стабилизирующее управление соответствует одной из возможных страте-

гий, рассматриваемых при биомеханических исследованиях процесса удержания позы человеком, стоящим на неустойчивой опоре.

Исходная нелинейная система уравнений движения линеаризована. Показано, что полученная при этом линейная система является вполне управляемой в смысле Калмана. Найдена область управляемости системы при ограниченном по абсолютной величине управляющем моменте. Построено управление, стабилизирующее неустойчивое положение равновесия с максимальной областью притяжения [2]. Это управление таково, что все его ресурсы используются для подавления двух неустойчивых мод, которые соответствуют двум неустойчивым жордановым переменным. Построенное управление имеет вид линейной обратной связи с насыщением. Граница области притяжения состояния равновесия при этом управлении определяется путем решения линейных уравнений движения в обратном времени. Это решение стремится к предельному циклу, который и представляет собой искомую границу (см. [2]). Изучено поведение системы при различных значениях общего коэффициента усиления в линейной обратной связи и показано, что при его росте граница области притяжения неограниченно приближается к границе области управляемости.

Численно проведен анализ траекторий движения в нелинейной системе при начальных состояниях, близких к границе области притяжения линейной системы. Проведено сравнение областей притяжения линеаризованной системы и исходной нелинейной. Показано, что область притяжения нелинейной системы находится внутри области притяжения линейной системы и близка к ней.

**Ключевые слова:** *двузвенный маятник, неустойчивая опора, стабилизация, область управляемости, область притяжения.*

### Литература

1. Гугаев К.В., Кручинин П.А., Формальский А.М. Модель удержания человеком равновесия на подвижной опоре в виде пресс-папье // Прикладная математика и механика. 2016. Т. 80, № 4. С. 450–460.
2. Формальский А.М. Управление движением неустойчивых объектов. Москва: Физматлит, 2012. 232 с.

## On stabilization of double inverted pendulum installed on seesaw

K.L. Voitsitskaya, P.A. Kruchinin, A.M. Formalskii

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: voitsitskaya96@gmail.com, pkruch@mech.math.msu.su, formal@imec.msu.ru

The problem of stabilization of the inverted double-link pendulum installed on seesaw is considered. The system is controlled by the torque applied in the inter-link joint of the pendulum. This torque is limited in

absolute value. The viscous resistance to the motion of the system is taken into account. A similar problem with the single-link pendulum is considered at [1].

The studied system has three degrees of freedom and one control action. Open loop system has an unstable equilibrium position with both links of the pendulum directed vertically upwards and not inclined seesaw. This system models a person who stands on the seesaw and tries to maintain the vertical posture using torques only in the hip joints. This stabilizing control corresponds to the so called hip-strategy. This strategy is one of the possible strategies studied in biomechanical investigations of postural control of a person standing on an unstable support.

The original nonlinear equations of motion are linearized. The linear system thus obtained is shown to be quite Kalman controllable. The controllability region with limited in absolute value control torque is found. Control law stabilizing the unstable equilibrium position with maximal as possible basin of attraction is designed [2]. All resources of this control are used to suppress two unstable modes which correspond to two unstable Jordan variables. This control law has the form of the linear feedback with saturation. The boundary of the basin of attraction with this control is determined by solving equations of motion in reverse time. This solution tends to the limit cycle which is the sought boundary (see [2]). The behavior of the system with different gain ratios of feedback is studied. If gain ratio grows, the basin of attraction tends to the controllability region.

Analysis of motion trajectories in original nonlinear system with initial conditions close to the boundary of basin of attraction of linearized system is performed numerically. The attraction basins of linearized system and original nonlinear one were compared. The basin of attraction of the nonlinear system is shown to be within the basin of attraction of the linearized system, and close thereto.

**Keywords:** *double-link pendulum, unstable support, stabilisation, controllability region, basin of attraction.*

## References

1. Gugayev K.V., Kruchinin P.A., Formalskii A.M. A model of maintaining balance by a person on the seesaw. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, vol. 80, no. 4, pp. 316–323.
2. Formalskii A.M. *Stabilization and Motion Control of Unstable Objects*. Berlin/Boston, Walter de Gruyter, 2015.

---

## **Метод оценки влияния погрешностей изготовления на перекрестную чувствительность многокомпонентного тензорезисторного силомоментного датчика**

С.И. Гавриленков, С.С. Гаврюшин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: gss@bmstu.ru; gavrilencov\_si@student.bmstu.ru

Многокомпонентные тензорезисторные силомоментные датчики находят широкое применение для задач управления роботами [1], особенно коллаборативными. Одной из наиболее критичных источников погрешности измерения таких датчиков является погрешность перекрестной чувствительности (взаимовлияние измерительных каналов датчика, измеряющих отдельные компоненты силы — вертикальная сила, боковая сила, момент и т. д.). Взаимовлияние может быть вызван неточным размещением тензорезисторов на упругом элементе датчика либо его несовершенной формой из-за погрешностей изготовления. В работе рассматривается метод оценки влияния погрешностей изготовления на перекрестную чувствительность многокомпонентного тензорезисторного силомоментного датчика. Метод основан на учете погрешностей изготовления (особенно погрешностей формы) в геометрической модели рассматриваемого датчика и моделировании перекрестной чувствительности с помощью открытого программного комплекса Salome-Meca/Code\_Aster. После этого проводится анализ напряженно-деформированного состояния упругого элемента датчика для нескольких расчетных случаев. Каждый расчетный случай представляет моделирование напряженно-деформированного состояния датчика под действием отдельного компонента нагрузки. После этого определяется выходной сигнал мостовых схемы каналов измерений отдельных компонентов силы, что позволяет вычислить перекрестную чувствительность. Эта серия расчетных случаев повторяется для каждого типа погрешности формы, после чего перекрестные чувствительности от каждого типа погрешности формы суммируются. Данный метод может быть применен в области проектирования силомоментных датчиков для определения конструкций, которые наиболее устойчивы к погрешностям изготовления и которые можно будет изготавливать на обычном оборудовании, что может снизить себестоимость датчиков. Этот метод также может быть использован технологами для назначения рациональных допусков на упругий элемент датчика исходя из максимальной допустимой перекрестной чувствительности. Кроме того, данный метод может быть модифицирован как инструмент для проектирования с учетом техно-

логических требований [3] применительно к другим деталям машин и приборов.

**Ключевые слова:** погрешность взаимовлияния, многокомпонентный силомоментный датчик, Code\_Aster, проектирование с учетом технологических требований.

### **Литература**

1. Sun Y., Liu Y., Zou T., Jin M., Liu H. Design and optimization of a novel six-axis force/torque sensor for space robot // Measurement, 2015, no. 65, pp. 135–148.
2. Antonutti R., Peyrard C., Incecik A., Ingram D., Johanning L. Dynamic mooring simulation with Code\_Aster with application to a floating wind turbine // Ocean Engineering, 2018, no. 151, pp. 366–377.
3. Favi C., Germani M., Mandolini M. Design for manufacturing and assembly vs. design to cost: toward a multi-objective approach for decision-making strategies during conceptual design of complex products // Procedia CIRP, 2016, no. 50, pp. 275–280.

## **Method of investigating the influence of manufacturing errors on the cross-talk error of multi-axis strain gauge force transducers**

S. I. Gavrilentov, S.S. Gavryushin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: gss@bmstu.ru; gavrilentov\_si@student.bmstu.ru

Multi-axis strain gauge force transducers are increasingly used for force control in robotics [1], especially in collaborative robots. One of the major sources of errors for multi-axis strain gauge force transducers is the cross-talk error (mutual interference of transducer's channels measuring individual load components — vertical force, lateral force, torque, etc.). Cross-talk errors stem from either imprecise placement of strain gauges on the transducer elastic element or the irregular shape of the transducer elastic element caused by manufacturing shape errors. This work considers a method of estimating the influence of manufacturing errors on cross-talk errors of a multi-axis strain gauge force transducer. The method is based on including manufacturing errors (especially, shape tolerances) in the geometric model of the transducer considered and modeling the cross-talk error using open-source FEA software package Salome-Meca/Code\_Aster. After that, the stress-strain state of the transducer elastic element is analyzed for several load cases. Each load case represents a simulation of the transducer just under a specific load component. The output signal of the transducer Wheatstone bridge measuring circuit is calculated using the information about the stress-strain state, enabling the calculation of the cross-talk error. This batch of load cases is conducted for each type of shape manufacturing error; after that, the cross-talk errors from different

shape errors are combined. In the area of transducer design, this method can be used to find the transducer constructions, which are more robust to manufacturing errors and can be manufactured using common machine tools, which will lower their cost. Alternatively, this method can be used by production engineers for assigning geometrical tolerances based on the maximum permissible cross-talk error. Besides, the method can be modified to be used as a “design for manufacturing” [3] tool for other parts of machines and instruments.

**Keywords:** *cross-talk errors, multi-axis force transducer, Code\_Aster, design for manufacturing*

### References

1. Sun, Y., Liu, Y., Zou, T., Jin, M., & Liu, H. (2015). Design and optimization of a novel six-axis force/torque sensor for space robot. *Measurement*, 65, 135–148.
2. Antonutti, R., Peyrard, C., Incecik, A., Ingram, D., & Johanning, L. (2018). Dynamic mooring simulation with Code\_Aster with application to a floating wind turbine. *Ocean Engineering*, 151, 366–377.
3. Favi, C., Germani, M., & Mandolini, M. (2016). Design for manufacturing and assembly vs. design to cost: toward a multi-objective approach for decision-making strategies during conceptual design of complex products. *Procedia CIRP*, 50, 275–280.

## Анализ и проектирование тонкостенных осесимметричных оболочек на основе многопараметрического подхода

С.С. Гаврюшин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: gss@bmstu.ru

Излагаются теоретические основы, численные алгоритмы и накопленный практический опыт в области расчета и проектирования функциональных элементов технических устройств (сенсоров и актуаторов), представляющих собой нелинейно деформируемые тонкостенные механические конструкции в форме осесимметричных оболочек. Процесс деформирования элементов может быть инициирован действием нескольких внешних управляющих величин (внешних сил, давления, температуры и т. д.). По этой причине решение задачи проектирования (синтеза) конструкции становится весьма трудоемким и вызывает необходимость разработки специальных подходов, предназначенных для своеобразного программирования деформационных свойств будущей конструкции. Характерной особенностью излагаемого многопараметрического подхода является построение и изучение гиперповерхности равновесных состояний, построенной в пространстве управляющих параметров задачи. При

численном анализе используется стратегия последовательного исследования однопараметрических нелинейных задач, принадлежащих многопараметрическому семейству, в которое погружена анализируемая задача. В основу алгоритма синтеза положен прием смены подпространства управляющих параметров, дополненный процедурой плавного перехода при смене подпространств.

Такой подход предоставляет возможность варьировать в процессе решения не только параметры нагрузки, но и параметры, характеризующие геометрию и физико-механические свойства конструкции, что обеспечивает конечную цель — синтез конструкции с требуемыми деформационными свойствами. Предлагаемая методика иллюстрируется конкретными примерами.

**Ключевые слова:** тонкостенные оболочки, нелинейное деформирование, многопараметрический подход, численные алгоритмы.

## **Analysis and design of thin-walled axisymmetric shells based on multiparametric approach**

S.S. Gavriushin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: gss@bmstu.ru

Theoretical foundations, numerical algorithms and accumulated practical experience in the field of analysis and design of technical devices functional elements (sensors and actuators), which are non-linearly deformable thin-walled mechanical structures in the form of axisymmetric shells, are presented. The process of elements deformation can be initiated by the action of several external control variables (external forces, pressure, temperature, etc.). For this reason, the solution of the structure design problem becomes very time-consuming and necessitates the development of special approaches designed for programming the deformation properties of the future structure. A characteristic feature of the multiparametric approach is the construction and study of the equilibrium states hypersurface, constructed in the control parameters space of the problem control parameters. The numerical analysis uses the strategy of sequential investigation of one-parameter nonlinear problems belonging to the multiparameter family in which the analyzed problem is immersed. The synthesis algorithm is based on the method of subspace change of control parameters, supplemented by the procedure of smooth transition when subspaces change.

This approach makes it possible to vary in the process of solving not only the load parameters, but also the parameters characterizing the geometry and physical and mechanical properties of the structure, which pro-



vides the ultimate goal—the synthesis of the structure with the required deformation properties. The proposed method is illustrated by specific examples.

**Keywords:** *thin-walled shells, nonlinear deformation, multiparametric approach, numerical algorithms.*

## **Исследование эффективности предсказательной диагностики на основе имитационных моделей и машинного обучения**

А.М. Гареев<sup>1</sup>, В.И. Проценко<sup>1</sup>, Д.М. Стадник<sup>1</sup>, Е.Ю. Минаев<sup>1</sup>,  
П.И. Грешняков<sup>1</sup>, Н.С. Давыдов<sup>1,2</sup>, А.Г. Гимадиев<sup>1</sup>, А.В. Никоноров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика  
С.П. Королёва, Самара, Россия

<sup>2</sup>Институт систем обработки изображений — филиал ФНИЦ «Кристаллография  
и фотоника» РАН, Самара, Россия

E-mail: gareyev@ssau.ru, artniko@gmail.com

Предсказательная диагностика основывается на непрерывном мониторинге системы с целью выявления участков или узлов падения производительности и прогнозирования узлов, нуждающихся в обслуживании. Ключевое преимущество методов диагностики, основанных на машинном обучении [1], по сравнению с методами математического моделирования [2] в том, что для построения успешного алгоритма обнаружения неисправностей не требуется построения точной физической модели. Однако на этапе первоначального обучения может возникнуть проблема нехватки данных. В настоящей работе исследуется подход к предсказательной диагностике на основе машинного обучения с использованием имитационной модели для формирования исходной обучающей выборки.

Исследуется электрогидромеханический узел (ЭГМУ) подачи рабочей жидкости в технологическом комплексе. Основными элементами ЭГМУ являются: электродвигатель, объемный насос, предохранительный клапан, пневмогидравлический аккумулятор. Для имитации различных условий работы ЭГМУ используется пропорциональный распределитель, устанавливаемый в напорной гидролинии. В качестве неисправностей рассматриваются внешняя негерметичность гидросистемы, утечка газа из ПГА в атмосферу и поломка пружины предохранительного клапана. Для исследования динамических процессов в ЭГМУ разработана его имитационная модель на базе ПО SimulationX. В результате моделирования сформирована база данных в виде массивов значений основных параметров системы (расход и давление рабочей среды), полученных при различных ее состояниях. Полученные данные использованы для обучения классификатора.

Для диагностики неисправности использовалась схема на основе четырехслойной нейронной сети с активационной функцией softmax в последнем слое и selu [3] в остальных. Архитектура сети описывается следующим образом: Flatten-D(200)-D(100)-D(50)-D(2), где Flatten — преобразование входного многомерного массива в плоский вектор значений, а буквой D обозначается полносвязный слой. Для обучения на основе исходных данных были сгенерированы данные проходом скользящего окна размером 100 со смещением 100. Было проведено обучение и валидация как на модельных, так и на стендовых данных.

Проведенное исследование подтверждает перспективность предложенного подхода использования данных, полученных на имитационной модели для обучения классификаторов диагностики неисправностей.

**Ключевые слова:** предсказательная диагностика, нейронные сети, Simulation X.

#### Литература

1. Gao Z., et al. A Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Techniques. Part I: Fault Diagnosis with Model-Based and Signal-Based Approaches // IEEE Trans. on Industrial Electronics. 2015.
2. Gao Z., et al. A Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Techniques. Part II: Fault Diagnosis with Knowledge-Based and Hybrid/Active Approaches // IEEE Trans. on Industrial Electronics. 2015.
3. Klambauer G., et al. Self-normalizing neural networks // Advances in neural information processing systems. 2017. Pp. 971–980.

### **Predictive maintenance effectiveness research based on simulation models and machine learning**

A.M. Gareev<sup>1</sup>, V.I. Protsenko<sup>1</sup>, D.M. Stadnik<sup>1</sup>, E.Y. Minaev<sup>1</sup>,  
P.I. Greshnyakov<sup>1</sup>, N.S. Davydov<sup>1,2</sup>, A.G. Gimadiev<sup>1</sup>, A.V. Nikonorov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University, Samara, Russia

<sup>2</sup>Image Processing Systems Institute, FSRC branch Crystallography and Photonics,  
Russian Academy of Science, Samara, Russia  
E-mail: gareyev@ssau.ru, artniko@gmail.com

Predictive maintenance is based on continuous monitoring of the system. The goal of this approach is identification of nodes where performance reduced and predicting nodes that need the maintenance. A key advantage of machine-learning-based diagnosis methods [1] over mathematical modeling methods [2] is that it does not require development of an accurate physical model to build a successful fault detection algorithm. However, during the initial training phase, a data shortage problem may occur. In this paper, we study the approach to predictive

diagnostics based on machine learning using a simulation model to form the initial training sample.

The electro-hydraulic unit (EGMU) of the working fluid supply in the technological complex is investigated. The main elements of the EGMU are: electric motor, displacement pump, safety valve, pneumohydraulic accumulator. To simulate various operating conditions of the EGMU, a proportional distributor installed in a pressure hydraulic line is used. As malfunctions, external leakage of the hydraulic system, gas leakage from the PHA to the atmosphere and breakage of the safety valve spring are considered. To study dynamic processes at EGMU, its simulation model based on SimulationX software has been developed. As a result of modeling, a database was formed in the form of arrays of values of the main system parameters (flow rate and pressure of the working medium) obtained at its various states. The data obtained were used to train the classifier.

For malfunction detection, we used a classifier based on a four-layer neural network with softmax activation function in the last layer and selu [3] in the rest. The network architecture is described as follows: Flatten-D(200)-D(100)-D(50)-D(2), where «Flatten» is the transformation of the input multidimensional array into a flat vector of values, and «D» denotes a fully connected layer. Training dataset samples were generated by splitting the original timeseries into windows of size 100. Training and validation was done on both model and experiment data.

The study confirms the prospects of the proposed approach of using simulation model data for training fault diagnosis classifiers.

**Keywords:** *predictive maintenance, neural networks, SimulationX.*

## References

1. Gao Z., et al. A Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Techniques. Part I: Fault Diagnosis with Model-Based and Signal-Based Approaches. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2015.
2. Gao Z., et al. A Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Techniques. Part II: Fault Diagnosis with Knowledge-Based and Hybrid/Active Approaches. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2015.
3. Klambauer G., et al. Self-normalizing neural networks. *Advances in neural information processing systems*, 2017, pp. 971–980.

**База данных по неисправностям  
электрогидромеханических узлов и их имитация  
в процессе экспериментальных исследований  
гидравлических систем**

А.М. Гареев, И.А. Попельнюк, Д.М. Стадник, В.Я. Свербилов

Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия  
E-mail: v.sverbilov@mail.ru

Для повышения эффективности диагностирования электрогидромеханических узлов (ЭГМУ) гидравлических систем по динамическим характеристикам целесообразно иметь имитационные модели характерных неисправностей. Такой подход позволяет заранее, еще на этапе математического моделирования, оценивать влияние различных неисправностей на функционирование ЭГМУ на основе базы данных по неисправностям и их имитационным моделям. В докладе проанализирована статистическая информация из литературных источников о характерных неисправностях ЭГМУ, рассмотрены причины их возникновения и влияния на функционирование гидравлических систем. Сформированы новые базы данных по типовым неисправностям, включающим внутренние и внешние утечки, залипание золотников, деградацию рабочей жидкости. Для представленных неисправностей разработаны и исследованы их имитационные модели в программном пакете MATLAB/Simulink. Описана реализация данных неисправностей на гидравлическом стенде для верификации их математических моделей. Предложенная база данных по неисправностям полезна при диагностике состояния ЭГМУ гидравлических систем при доводке и эксплуатации.

**Ключевые слова:** база данных неисправностей, диагностирование, динамические свойства, моделирование, тестирование.

**Database on faults of electro-hydro-mechanical units  
and their simulation in the course of pilot studies  
of hydraulic systems**

Albert Gareev, Ilya Popelnyuk, Dmitry Stadnik, Viktor Sverbilov

Samara National Research University, Samara, Russia  
E-mail: v.sverbilov@mail.ru

For increase in efficiency of diagnosing of electro-hydro-mechanical units of hydraulic systems on the basis of dynamic properties it is reasonable to have simulation models of typical faults. Such approach allows

estimating in advance (at a stage of mathematical modeling) influence of different faults on functioning of hydraulic systems. In the paper, statistical information from literature sources on typical faults of electro-hydro-mechanical units is analyzed, the reasons of their occurrence and influence on functioning of hydraulic systems are considered. New database on typical faults is formed. It includes internal and external leakages, spool and sleeve sticking, degradation of working fluid. For the faults presented in the database, simulation models are developed and studied in the Matlab/Simulink software package. Implementation of these faults at the hydraulic test bench for verification of their mathematical models is described. The proposed database of faults will be helpful for diagnosing of the state of electro-hydro-mechanical units of hydraulic systems in the operation and the pilot studies

**Keywords:** *database of faults, diagnosing, dynamic properties, simulation, testing.*

## **Анализ результатов численного моделирования ударной деформации частиц при нанесении порошковых покрытий**

М.Г. Гиорбелидзе, В.Ю. Христосова

Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия  
E-mail: m.giorbelidze@ssau.ru; hristosova@mail.ru

Защитные и функциональные свойства порошковых покрытий зависят от большого количества переменных факторов, возникающих с момента подготовки порошкового материала, его нагрева, ускорения и переноса в газовых потоках и последующего взаимодействия с поверхностью детали [1–6]. Частицы порошкового материала имеют существенный разброс по размерам и существенно отличаются по скоростям, траекториям движения, температурам нагрева и характеру ударного взаимодействия. Эти причины приводят к существенному разбросу физико-механических свойств из-за существенно отличающихся условий образования отдельных кластеров структуры покрытия.

Проведено численное конечно-элементное моделирование ударной деформации частиц о жесткую преграду в программной среде ANSYS. При моделировании использовались традиционные фракции порошкового материала Ni-Co-Cr-Al-Y и учитывались скорости и температуры нагрева характерных частиц этих фракций в соответствии с реальными режимами напыления. Исследовалось одновременное влияние теплового и кинетического факторов процесса напыления на степень ударной деформации, длительность удара и на

параметры формирующегося кластера покрытия. Разные скорости и температуры нагрева частиц разного размера приводят к образованию кластеров с сильно отличающимися параметрами и разной зоной контакта. Это неизбежно приведет к снижению прочности сцепления с поверхностью детали и возникновению анизотропии свойств. Установлено, что наибольшее влияние на ударную деформацию частиц оказывает температура нагрева, а на длительность удара — скорость частицы.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-0095919.*

**Ключевые слова:** *порошковые покрытия, численное конечно-элементное моделирование, ударная деформация, кластер.*

### **Литература**

1. *Барвинок В.А.* Плазма в технологии, надежность, ресурс. Москва: Наука и технологии, 2005. 456 с.
2. *Барвинок В.А., Богданович В.И.* Физическое и математическое моделирование процесса формирования мезоструктурноупорядоченных плазменных покрытий // Журнал технической физики. 2012. Т. 82, вып. 2. С. 105–112.
3. *Бобров Г.В., Ильин А.А., Спектор В.С.* Теория и технология формирования неорганических покрытий. Москва: Альфа-М, 2014. 925 с.
4. *Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М.* Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. Москва: Физматлит, 2010. 536 с.
5. *Пузряков А.Ф.* Теоретические основы технологии плазменного напыления. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 458 с.
6. *Heimann R.B.* Plasma spray coating. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft GmbH, 1996. 352 p.

## **Analysis of the particle shock deformation numerical simulation results during powder coating**

M.G. Giorbelidze, V.Yu. Hristosova

Samara National Research University, Samara, Russia  
E-mail: m.giorbelidze@ssau.ru; hristosova@mail.ru

Protective and functional properties of powder coatings depend on a large number of variable factors arising from the preparation of the powder material, its heating, acceleration and transfer in gas flows and subsequent interaction with the surface of the part [1–6]. The particles of the powder material have a significant variation in size and differ significantly in speeds, trajectories, heating temperatures and the nature of the impact interaction. These reasons lead to a significant dispersion of physical and mechanical properties due to significantly different conditions for the formation of individual clusters of the coating structure.

Numerical finite element modeling of particle shock deformation against a rigid barrier in ANSYS software environment is carried out. The simulation used traditional fractions of Ni-Co-Cr-Al-Y powder material and took into account the heating rates and temperatures of the characteristic particles of these fractions in accordance with the actual spraying modes. The simultaneous influence of thermal and kinetic factors of the deposition process on the degree of shock deformation, the duration of the impact and the parameters of the emerging coating cluster was studied. Different speeds and temperatures of heating particles of different sizes lead to the formation of clusters with very different parameters and different contact zone. This will inevitably lead to a decrease in the adhesion strength to the surface of the part and the appearance of anisotropy properties. It is established that the greatest influence on the shock deformation of particles is exerted by the heating temperature, and on the duration of the impact — the speed of the particle.

*The reported study was funded by RFBR according to the research project No. 18-38-0095919.*

**Keywords:** powder coatings, numerical finite element modeling, shock deformation, cluster.

#### References

1. Barvinok V.A. *Plasma in Technology: Reliability and Resource*. Moscow, Science and technology Publ., 2005, 456 p.
2. Barvinok V.A., Bogdanovich V.I. Physical and Mathematical Simulation of the Formation of Mesostructure-Ordered Plasma Coatings. *Technical physics*, 2012, vol. 57, iss. 2, pp. 262–269.
3. Bobrov G.V., Ilin A.A., Spektor V.S. *Theory and technology of inorganic coatings formation*. Moscow, Alfa-M, 2014, 925 p.
4. Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., Fomin V.M. *Cold gas-dynamic spraying. Theory and practice*. Moscow, Fizmatlit, 2010, 536 p.
5. Puzryakov A.F. *Theoretical bases of plasma spraying technology*. Moscow, Bauman University Publ., 2003, 458 p.
6. Heimann R.B. *Plasma spray coating*. Weinheim, VCH Verlagsgesellschaft GmbH, 1996, 352 p.

### Оценка применимости квазистатического подхода в задаче о двухзвенном аэродинамическом маятнике

А.П. Голуб, Ю.Д. Селюцкий

НИИ механики МГУ, Москва, Россия  
E-mail: holub.imech@gmail.com

Рассматривается двухзвенный аэродинамический маятник, вдоль второго звена которого расположено симметричное крыло. Аэродинамическое воздействие на крыло описывается с помощью квазиста-

тического подхода. Исследуется влияние положения крыла на поведение маятника. Показано, что в определенном диапазоне параметров системы существуют два установившихся колебательных режима. Проведен сравнительный анализ результатов численного моделирования и эксперимента. Дана оценка применимости квазистатического подхода для описания аэродинамического воздействия на систему.

**Ключевые слова:** *колебания, маятниковые системы, квазистатический подход, аэродинамика.*

### **Estimation of the applicability of the quasi-steady approach in the problem of a double aerodynamic pendulum**

A.P. Holub, Yu.D. Selyutskiy

Institute of Mechanics of Lomonosov MSU, Moscow, Russia  
E-mail: holub.imech@gmail.com

A double aerodynamic pendulum is considered with a symmetric wing fixed to the second link. The aerodynamic load is described with the quasi-steady approach. The influence of the position of the wing on the behavior of the pendulum is studied. It is shown that two steady oscillatory regimes exist in a certain range of system parameters. Comparative analysis of results of numerical simulation and experiments is performed. The applicability of the quasi-steady approach for description of the aerodynamic load in this system is assessed.

**Keywords:** *pendulum systems, quasi-steady approach, aerodynamics.*

### **Использование перфорации поверхности для управления аэродинамическими характеристиками летательных аппаратов и их элементов при дозвуковых скоростях обтекания**

А.Г. Голубев, Е.Г. Столярова, М.Д. Калугина

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: alexeygg@mail.ru, maria224466@yandex.ru

Перфорация обтекаемой поверхности является одним из способов управления параметрами обтекания летательных аппаратов (ЛА) и отдельных элементов конструкции [1]. Использование сквозной перфорации позволяет изменять структуры обтекания, а следовательно, аэродинамические характеристики (АДХ) ЛА.

В данной работе представлен обзор использования перфорированных поверхностей при дозвуковых скоростях обтекания различ-



ных разновидностей ЛА. Более детально рассмотрен процесс обтекания перфорированной и сплошной плоской пластины путем моделирования в программе SolidWorks в пакете FlowSimulation, где проведен численный расчет аэродинамических характеристик пластин с различной степенью перфорации на различных углах атаки. Выполнен анализ полученных результатов и представлено сравнение с экспериментальными данными.

Для проведения процесса моделирования трехмерного обтекания были выбраны плоская перфорированная пластина с длиной стороны  $L = 0,15$  м, толщиной  $b = 0,002$  м, радиусом скругления сторон  $r = 0,001$  м и неперфорированная с такими же геометрическими параметрами. Углы атаки изменялись в диапазоне  $\alpha = 0^\circ \dots 90^\circ$  с шагом  $\Delta\alpha = 30^\circ$ . Параметры дозвукового потока соответствовали числу Рейнольдса  $Re = 2,5 \cdot 10^5$ , рассчитанному по длине пластины.

Основным отличием обтекания перфорированной пластины является переток воздуха через перфорацию с наветренной стороны на подветренную. В результате моделирования было установлено, что при малых углах атаки интенсивность струек воздуха, проходящих сквозь перфорацию, уменьшается с увеличением расстояния от передней кромки из-за уменьшения разницы давлений между подветренной и наветренной сторонами пластины [2]. Скорость на входе в отверстия, расположенные близко к передней кромке пластины, почти совпадает с нормалью к плоскости пластины, поэтому их эффективная площадь больше. При увеличении угла атаки картина их обтекания меняется слабо. При  $\alpha = 90^\circ$  интенсивность перетока во всех отверстиях практически одинакова независимо от их расположения.

Течение через перфорацию приводит к образованию дополнительных мелких вихрей на подветренной стороне пластины. Интенсивность этого процесса зависит от степени перфорации и угла атаки.

Полученные результаты могут быть полезны при проектировании современных самолетов и ракет, поскольку благодаря использованию перфорированных поверхностей становится возможным повысить эффективность функционирования органов управления летательных аппаратов различного назначения.

**Ключевые слова:** перфорированные поверхности, аэродинамические характеристики, дозвуковое обтекание.

### Литература

1. Chernukha P.A., Raffel M., Kalugin V.T. Experimental and numerical modeling of flow around perforated stabilizing devices. New results in numerical and experimental fluid mechanics, 2010, VIII, pp. 169–177.
2. Frink N.T., Bauer S.X.S., Hunter C.A. Simulation of flows with passive porosity. ISAC Congress, 2002.

## **The use of surface perforation to control the aerodynamic characteristics of aircraft and their elements at subsonic flow speeds**

A.G. Golubev, E.G. Stolyarova, M.D. Kalugina

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: alexeygg@mail.ru, maria224466@yandex.ru

Perforation of a streamlined surface is one way to control the parameters of the flow around aircraft and individual structural components [1]. The use of perforation allows you to change the flow structure, and therefore the aerodynamic characteristics of the aircraft.

This paper presents an overview of the use of perforated surfaces at subsonic speeds around various types of aircraft. The flow around a perforated and solid flat plate is considered in more detail by simulating in the SolidWorks program in the FlowSimulation package, where the aerodynamic characteristics of plates with different degrees of perforation at different angles of attack are numerically calculated. An analysis of the results obtained and a comparison with experimental data are performed.

To carry out the process of modeling three-dimensional flow around, a flat perforated plate with a side length  $L = 0.15$  m, a thickness  $b = 0.002$  m, a spherical radius of the sides  $r = 0.001$  m and non-perforated with the same geometric parameters was chosen. The angles of attack varied in the range  $\alpha = 0^\circ \dots 90^\circ$  in increments of  $\Delta\alpha = 30^\circ$ . The subsonic flow parameters corresponded to the Reynolds number  $Re = 2.5 \cdot 10^5$  calculated from the plate length.

The main difference between the flows around a perforated plate is the flow of air through perforations from the windward side to the leeward side. As a result of modeling, it was found that at small angles of attack, the intensity of air streams passing through the perforation decreases with increasing distance from the leading edge due to a decrease in the pressure difference between the leeward and windward sides of the plate [2]. The speed at the entrance to the holes located close to the front edge of the plate almost coincides with the normal to the plane of the plate, so their effective area is greater. With an increase in the angle of attack, the picture of their flow around doesn't vary significantly. At  $\alpha = 90^\circ$ , the flow rate in all perforations is almost the same regardless of their location.

The flow through the perforation leads to the formation of additional small vortices on the leeward side of the plate. The intensity of this process depends on the degree of perforation and the angle of attack.

The results obtained can be useful in the design of modern aircraft and rockets, because through the use of perforated surfaces it becomes possible to increase the efficiency of the controls of aircraft for various purposes.

**Keywords:** *perforated surfaces, aerodynamic characteristics, subsonic flow.*

### References

1. Chernukha P.A., Raffel M., Kalugin V.T. (2010). Experimental and numerical modeling of flow around perforated stabilizing devices. *New results in numerical and experimental fluid mechanics VIII*, pp. 169–177.
2. Frink N.T., Bauer S.X.S., and Hunter C.A. Simulation of flows with passive porosity. *ISAC Congress*, 2002.

## Поведение шестиногого робота в аварийной ситуации

Ю.Ф. Голубев<sup>1,2</sup>, В.В. Корянов<sup>1</sup>, Е.В. Мелкумова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
E-mail: golubev@keldysh.ru, elena\_v\_m@mail.ru

Показано, что автономное спасение шестиногой машины из аварийного положения «вверх ногами» возможно с помощью циклического движения ног, если корпус имеет верхнюю оболочку в виде усеченного цилиндра. Предложен метод раскачивания корпуса, обеспечивающий переворот корпуса и возвращение робота в рабочее положение. Выполнено аналитическое исследование и компьютерное моделирование полной динамики робота, подтвердившие эффективность разработанной методики для восстановления функциональной состоятельности робота. Приводятся результаты численных экспериментов и соответствующие видеоматериалы. При движении робота по бездорожью могут возникать разные аварийные ситуации. При отсутствии поломок наиболее катастрофичным представляется случай, когда из-за падения робот оказывается в перевернутой позиции с ногами, ориентированными вверх, и корпусом, лежащим на опорной плоскости. Для многоногого робота с корпусом в виде прямоугольного параллелепипеда обратный переворот корпуса трудновыполним. Возможен спасительный вариант, когда за счет конструкции робота можно двигаться и в перевернутом положении.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-01-00123 А).*

**Ключевые слова:** *шестиногий робот, аварийная ситуация, переворот корпуса, раскачивание.*

## Behavior of the six-legged robot in emergency situation

Yu.F. Golubev<sup>1,2</sup>, V.V. Koryanov<sup>1</sup>, E.V. Melkumova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: golubev@keldysh.ru; elena\_v\_m@mail.ru

It is shown that the Autonomous rescue of a six-legged machine from an emergency position “upside down” is possible with the help of cyclic movement of the legs, if the body has an upper shell in the form of a truncated cylinder. A method is proposed of rocking the body, which provides a flipping of the body and the return of the robot to the operating position. An analytical study and computer simulation of the full dynamics of the robot were fulfilled which confirmed the effectiveness of the developed technique for restore the functional capability of the robot. The results of numerical experiments and corresponding video materials are presented. When a robot moves cross country, emergency situations can occur. Except for hardware failures, the worst of such situations is the case when the robot turns out to be in the upside down position when its body lies on the supporting plane with its legs upwards. For a multi legged robot with a box-shaped body, it is extremely difficult to bring itself to the normal position. A possible way out is the have a special leg design enabling the robot to move both in the normal and the upside down position of the body.

*The work was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 19-01-00123 A).*

**Keywords:** six-legged robot, emergency, flipping of the robot’s body, rocking.

## Перенос хрупкого цилиндра манипулятором с трехпальцевым схватом

Ю.Ф. Голубев<sup>1,2</sup>, Е.В. Мелкумова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: golubev@keldysh.ru; elena\_v\_m@mail.ru

Исследуется задача об удержании хрупкого прямого кругового шероховатого цилиндра пальцами рук робота-манипулятора. Каждый из пальцев имеет одну точку в контакте с цилиндром с трением Амонтона — Кулона и для двух точек опоры с трением вращения. Численно и аналитически получены возможные области расположения точек контакта на цилиндре, для которых существует решение задачи кинестатики при переносе цилиндра двумя и тремя пальца-

ми. Эта задача имеет аналогии задачам о равновесии многоногого шагающего робота на поверхности объекта цилиндрической формы или робота, опирающегося на произвольную поверхность, точки подвеса ног которого расположены на корпусе на поверхности цилиндра. Робот может удерживать цилиндр двумя пальцами, расположенными на одном диаметре в основании цилиндра, и за счет сухого трения двумя пальцами, расположенными по разные стороны от центра масс цилиндра или вводимой в динамику точки  $C$ . Аналогией задачи служат колебания цилиндра на цилиндре в окрестности устойчивого положения равновесия. Цилиндр лежит на одном пальце руки человекоподобного робота перпендикулярно ему, концом другого пальца придерживается. Аналогично держится стакан.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-01-00123 А).*

**Ключевые слова:** *трехпальцевый схват, трение Амонтона — Кулона, трехногий робот.*

## **Brittle cylinder transferring by a manipulator three-finger grasp**

Yu.F. Golubev<sup>1,2</sup>, E.V. Melkumova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: golubev@keldysh.ru; elena\_v\_m@mail.ru

We consider the problem of brittle cylinder grasping by the manipulator fingers. Each finger contacts the cylinder in a single supporting point with Amontons–Coulomb or for two footholds spinning friction. Using numerical simulations and analytically, possible locations of the contact points on the cylinder, for which there is a kinetostatics problem solution when the cylinder is moved by three fingers, are received. There is an analogy of the equilibrium of a three-legged robot on a cylinder for the problems of transfer by a manipulator with a three-finger grasp of a cylinder or for a robot on a surface which legs suspension points are on the cylinder surface. Two supporting points can be on one diameter in the cylinder base. Or because of friction on the opposite sides of the robot center of mass or giving in the dynamics, point  $C$ . The analogy of the problem is oscillations in the vicinity of the stable equilibrium one cylinder on another. The cylinder lies on one finger rectangular to it, of the hand of a humanoid robot, adheres to the end of the other finger. Similarly holds the glass.

*The work was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 19-01-00123 А).*

**Keywords:** *three-finger grasp, Amontons–Coulomb friction, three-legged robot.*

## Оценка траекторных параметров дальнобойного снаряда

Д.А. Гришко<sup>1</sup>, О.Д. Гаранин<sup>1</sup>, А.Ф. Рзаев<sup>1</sup>, А.Ю. Фёдоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup>Лицей № 1501, Москва, Россия

E-mail: dim.gr@mail.ru

Предметом исследования является динамика изменения траекторных параметров снаряда M795 (стандарт НАТО) при стрельбе на различные дальности из гаубицы AS-90. Снаряд моделируется как твердое тело, его приближенные аэродинамические характеристики для диапазона углов атаки 0...30 градусов получены с использованием модуля Flow Simulation программного пакета SolidWorks. Моделирование полета выполнялось в привязке к вращающейся Земле с интегрированием методом Рунге — Кутты 4-го порядка; результаты расчета частично проверялись интегрированием методом Эйлера в плоскопараллельном поле силы тяжести. Полет снаряда происходит в плотных слоях атмосферы с начальной сверхзвуковой скоростью. Предварительные данные расчетов свидетельствуют о большом запасе статической устойчивости изделия в предположении, что ствол гаубицы является гладким и снаряд не имеет начальной угловой скорости по крену. Максимальная дальность полета, полученная расчетным путем, хорошо согласуется с тактико-техническими характеристиками гаубицы, известными из открытых источников. Дальнейшим направлением работ будет попытка учета эффектов, вызванных вращением снаряда по крену при вылете из нарезного ствола.

**Ключевые слова:** снаряд M795, гаубица AS-90, траектория полета, статическая устойчивость движения.

## Estimation of trajectory parameters of the long-range projectile

D.A. Grishko<sup>1</sup>, O.D. Garanin<sup>1</sup>, A.F. Rzaev<sup>1</sup>, A.Yu. Fedorov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Lyceum 1501, Moscow, Russia

E-mail: dim.gr@mail.ru

The study is focused on the dynamics of trajectory parameters of M795 projectile (NATO standard) which is compatible with AS-90 howitzer. Several shooting distances have been studied. The projectile is considered as a solid body, its approximate aerodynamic functions were obtained in the interval of 0...30 degrees of attack angle using Flow Simulation module of SolidWorks software package. The flight simulation was implemented with respect to the rotating Earth with 4th order Runge — Kutta

method of numerical integration. The results of calculation have been partially checked by Euler integration in the g-constant homogeneous gravity field. The projectile flies in the dense atmosphere with initial supersonic velocity. The preliminary calculations show the object has a great reserve of static stability. These calculations were made in suggestion that the barrel is rifled and the projectile does not have initial angular velocity in roll channel. The maximal flight distance, obtained from the calculations, mostly corresponds to the howitzer's technical characteristics, which are available from the open sources. The following activity will be concerned with effects caused by projectile's spinning while leaving the rifled barrel.

**Keywords:** *M795 projectile, AS-90 howitzer, flight trajectory, static stability of motion.*

### **Обобщенные многопараметрические модели прогнозирования определяющих характеристик композитов при воздействии экстремальных факторов внешней среды**

Е.Л. Гусев<sup>1,2</sup>, В.Н. Бакулин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН, Якутск, Россия

<sup>2</sup> Институт математики и информатики Северо-Восточного  
федерального университета, Якутск, Россия

<sup>3</sup> Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия

E-mail: elgusev@mail.ru

Исследованы вопросы разработки эффективных, уточненных методов прогнозирования определяющих характеристик композитов, основанных на современных достижениях в области математического и компьютерного моделирования.

На основе принципа множественности моделей прогнозирования разработаны обобщенные многопараметрические модели прогнозирования оптимальной структуры и сложности, описывающие воздействие нескольких экстремальных дестабилизирующих факторов различной физической природы на композиционные материалы и конструкции. В рамках разработанных многопараметрических моделей можно решать как задачи прогнозирования остаточного ресурса, прочности, надежности, долговечности при воздействии неопределенного числа экстремальных факторов, так и задачи прогнозирования при воздействии строго определенных заранее известных факторов, например, при воздействии факторов, связанных с климатическим воздействием и процессами упрочнения.

Разработаны методы решения обратных задач прогнозирования в уточненных вариационных постановках на основе принципа мно-

жественности моделей прогнозирования, позволяющие на многопараметрическом семействе моделей построить модель оптимальной сложности. Разработанные методы решения обратных задач прогнозирования в уточненных постановках на основе принципа множественности моделей прогнозирования могут быть применены для решения широкого круга практических задач прогнозирования остаточного ресурса, долговечности, прочности сложнопостроенных композитов в таких современных областях, как авиационная и космическая техника, нефтяная и газовая промышленность, судостроение и т. п.

**Ключевые слова:** композиционные материалы, обобщенные многопараметрические модели прогнозирования, остаточный ресурс, долгосрочное прогнозирование, экстремальные климатические факторы, принцип множественности моделей прогнозирования, модель прогнозирования оптимальной сложности.

### **Литература**

1. Gusev E.L. Using parallel procedures for the searching of the extremum for the decision of the inverse problems prediction of the defining characteristics of the composite materials // Material Physics and Mechanics, 2016, vol. 26, no. 1, pp. 70–72.
2. Gusev E.L., Bakulin V.N. Variation formulations of inverse problems in forecasting the residual life of composites // Doklady Physics, 2018, vol. 63, no. 9, pp. 388–392.

## **Generalized multiparametric models for predicting the defining characteristics of composites under the influence of extreme factors of the external environment**

E.L. Gusev<sup>1,2</sup>, V.N. Bakulin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of oil and gas problems of Siberian Branch of RAS, Yakutsk, Russia

<sup>2</sup> Institute of mathematics and informatics of North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

<sup>3</sup> Institute of Applied Mechanics RAS, Moscow, Russia

E-mail: elgusev@mail.ru

Questions of development of effective, refined methods of forecasting of defining characteristics of composites based on modern achievements in the field of mathematical and computer modeling are investigated.

On the basis of the principle of multiplicity of forecasting models, generalized multiparametric forecasting models of optimal structure and complexity are developed, describing the impact of several extreme destabilizing factors of different physical nature on composite materials and structures. In the framework of the developed multivariable models to solve the problem of predicting the remaining resource, strength, reliability, durability as when exposed to an indefinite number of extreme factors and the problem of predicting when exposed strictly defined in advance of known factors, for example, when exposed to factors associated with climatic processes and hardening.



Methods for solving inverse forecasting problems in refined variational formulations based on the principle of multiplicity of forecasting models are developed, which allow to build a model of optimal complexity on a multiparametric family of models. The developed methods for solving inverse forecasting problems in refined formulations on the basis of the principle of multiplicity of forecasting models can be applied to solve a wide range of practical problems of forecasting the residual life, durability, strength of complex composites in such modern areas as aviation and space technology, oil and gas industry, shipbuilding, etc.

**Keywords:** *composite materials, generalized multiparametric forecasting models, residual resource, long-term forecasting, extreme climatic factors, the principle of multiplicity of forecasting models, the forecasting model of optimal complexity.*

### References

1. Gusev E.L. Using parallel procedures for the searching of the extremum for the decision of the inverse problems prediction of the defining characteristics of the composite materials. *Material Physics and Mechanics*, 2016, vol. 26, no. 1, pp. 70–72.
2. Gusev E.L., Bakulin V.N. Variation formulations of inverse problems in forecasting the residual life of composites. *Doklady Physics*, 2018, vol. 63, no. 9, pp. 388–392.

## **Асимптотическая теория композитных цилиндрических оболочек при термомеханическом нагружении**

Ю.И. Димитриенко, Е.А. Губарева, А.Е. Пичугина

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: dimit.bmstu@gmail.com, elena.a.gubareva@yandex.ru,  
a.e.pichugina@gmail.com

Предложена теория термомеханического нагружения тонких многослойных анизотропных композитных цилиндрических оболочек при совместном воздействии внешнего давления, моментов сил и нестационарного неравномерного нагрева. Применен асимптотический метод вывода основных уравнений теории оболочек из общей трехмерной теории термоупругости в криволинейных координатах. Сформулирована рекуррентная последовательность локальных задач теории термоупругости и получены аналитические решения этих задач. Показано, что данный подход позволяет получить выражения для всех шести компонент тензора напряжений по толщине оболочки. Рассмотрен пример расчета цилиндрической оболочки с осесимметричным изгибом с учетом неравномерного нагрева. Проведен параметрический анализ зависимостей компонент тензора напряжений

от локальных координат при различных углах армирования композита. Показано, что предложенный метод обеспечивает высокую точность расчета напряжений и перемещений и не приводит к повышению порядка общей системы дифференциальных уравнений теории оболочек.

**Ключевые слова:** тонкие цилиндрические оболочки, асимптотическая теория, термомеханика, композиционные материалы.

### **Литература**

1. Димитриенко Ю.И. Асимптотическая теория многослойных тонких пластин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2012, № 3, с. 86–100.
2. Димитриенко Ю.И., Губарева Е.А., Сборщиков С.В. Асимптотическая теория конструктивно-ортотропных пластин с двухпериодической структурой // Математическое моделирование и численные методы. 2014, № 1 (1), с. 36–56.
3. Димитриенко Ю.И., Губарева Е.А., Юрин Ю.В. Расчет полного тензора напряжений в тонких моноклинных композитных оболочках на основе метода асимптотической гомогенизации // Инженерный журнал: наука и инновации, 2016, вып. 12 (60). DOI: 10.18698/2308-6033-2016-12-1557

## **Asymptotic theory of composite cylindrical shells under thermomechanical loading**

Yu.I. Dimitrienko, E.A. Gubareva, A.E. Pichugina

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: dimit.bmstu@gmail.com, elena.a.gubareva@yandex.ru,  
a.e.pichugina@gmail.com

The theory of thermomechanical loading of thin multilayer anisotropic composite cylindrical shells under the combined influence of external pressure, moments of force and non-stationary non-uniform heating is proposed. The asymptotic method of deriving the basic equations of shell theory from the general three-dimensional theory of thermoelasticity in curvilinear coordinates is applied. A recurrent sequence of local problems of the theory of thermoelasticity is formulated and analytical solutions to these problems are obtained. It is shown that this approach allows one to obtain expressions for all 6 components of the stress tensor over the shell thickness. An example of calculating a cylindrical shell with axisymmetric bending, taking into account uneven heating, is considered. A parametric analysis of the dependences of the components of the stress tensor on the local coordinates at various angles of the reinforcement of the composite is carried out. It is shown that the proposed method provides high accuracy in calculating stresses and displacements, and does not increase the order of the general system of differential equations of shell theory.

**Keywords:** thin cylindrical shells, asymptotic theory, thermomechanics, composite materials.

---

**References**

1. Dimitrienko Yu.I. Asymptotic theory of multilayer thin plates. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University Series Natural Sciences*, 2012, no. 3, pp. 86–100.
2. Dimitrienko Yu.I., Gubareva E.A., Sborschikov S.V. Asymptotic theory of constructively orthotropic plates with a two-period structure. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody — Mathematical Modeling and Computational Method*, 2014, no. 1, pp. 36–57.
3. Dimitrienko Y.I., Gubareva E.A., Yurin Yu.V. Explicit formulas for the calculation of the complete tensor of the stresses in the monoclinic thin composite shells based on the asymptotic homogenization method. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, iss. 12 (60).  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-12-1557>

## **Расчет устойчивости тонких композитных пластин при комплексном термосиловом воздействии на основе асимптотического анализа трехмерных уравнений**

Ю.И. Димитриенко, Е.А. Губарева, А.А. Шурпо

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: dimit.bmstu@gmail.com, elena.a.gubareva@yandex.ru,  
shunikishina@gmail.com

Предложена теория устойчивости тонких пластин при комплексном термосиловом нагружении. Уравнения теории устойчивости выведены на основе общих трехмерных уравнений теории упругости и трехмерной теории устойчивости, а также нестационарного трехмерного уравнения теплопроводности, без введения каких-либо допущений относительно характера перемещений и напряжений по толщине пластины. В основе метода — анализ асимптотических разложений основных уравнений по малому геометрическому параметру, представляющему отношение толщины пластины к ее длине. Выведены в общем виде локальные задачи до третьего порядка включительно для основного и варьированного состояния пластины. По предложенной теории произведен расчет устойчивости прямоугольной пластины при воздействии неравномерного продольного нагружения и переменного нестационарного температурного поля. Проведен анализ влияния неравномерного нагрева на устойчивость пластин при различных схемах армирования.

**Ключевые слова:** тонкие пластины, асимптотическая теория, теория устойчивости, локальные задачи, композиционные материалы, термомеханика.

## Литература

1. Димитриенко Ю.И. Обобщенная трехмерная теория устойчивости. Часть 2: Малые деформации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2014. № 1. С. 17–26.
2. Димитриенко Ю.И. Механика сплошной среды. Т. 4. Основы механики твердых сред. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 624 с.
3. Димитриенко Ю.И., Губарева Е.А., Сборщиков С.В. Асимптотическая теория конструктивно-ортотропных пластин с двухпериодической структурой // Математическое моделирование и численные методы. 2014. № 1. С. 36–57.

## Calculation of the stability of thin composite plates under complex thermo-force action based on an asymptotic analysis of three-dimensional equations

Yu.I. Dimitrienko, E.A. Gubareva, A.A. Shurpo

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: dimit.bmstu@gmail.com, elena.a.gubareva@yandex.ru,  
shunikishina@gmail.com

The theory of the stability of thin plates under complex thermo-force loading is proposed. The equations of the theory of stability are derived on the basis of the general three-dimensional equations of the theory of elasticity and the three-dimensional theory of stability, as well as the non-stationary three-dimensional equation of heat conduction, without introducing any assumptions regarding the nature of displacements and stresses along the plate thickness. The method is based on the analysis of asymptotic expansions of the basic equations with respect to a small geometric parameter representing the ratio of the plate thickness to its length. Local problems up to the third order inclusive for the ground and varied state of the plate are derived in general form. According to the proposed theory, the stability of a rectangular plate under the influence of uneven longitudinal loading and an alternating non-stationary temperature field is calculated. The effect of uneven heating on the stability of the plates, with various schemes of reinforcement was analyzed.

**Keywords:** *thin plates, asymptotic theory, stability theory, local problems, composite materials, thermomechanics.*

## References

1. Dimitrienko Yu.I. Generalized Three-Dimensional Theory of Elastic Body Stability. Part 2. Small Deformations *Vestnik MGTU im N.E.Baumana. Ser. Estestvennye nauki — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Natural Sciences*, 2014, no. 1, pp. 17–26.
2. Dimitrienko Yu.I. *Osnovi Mekhaniki Tverdikh Sred/ Mekhanika Sploshnoy Sredy* [Bases of Solid Mechanics/ Continuum Mechanics]. Vol. 4. Moscow, Bauman Press, 2013, 624 p.

3. Dimitrienko Yu.I., Gubareva E.A., Sborschikov S.V. Asymptotic theory of constructive-orthotropic plates with two-periodic structures. *Mathematical modeling and Computational Methods*, 2014, no. 1, pp. 36–57.

## **Моделирование деформирования слоистых композиционных материалов с конечными деформациями на основе универсальных определяющих соотношений**

Ю.И. Димитриенко, С.Б. Каримов, Д.Ю. Кольжанова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: dimit.bmstu@gmail.com, sunnat49@yandex.ru, darya.kolzhanova@yandex.ru

Представлены результаты разработки модели деформирования слоистых композитов с конечными деформациями по характеристикам отдельных слоев. Предложен вариант метода асимптотической гомогенизации для слоистых композитов с конечными деформациями и периодической структурой. Метод позволяет рассчитывать эффективные диаграммы деформирования слоистых композитов с конечными деформациями, связывающие компоненты осредненных тензоров напряжений Пиолы — Кирхгофа и градиента деформаций. Проведены численные расчеты для моделей нелинейно-упругих сред с конечными деформациями с использованием универсальных моделей определяющих соотношений для случая сжимаемых и несжимаемых слоев композита.

**Ключевые слова:** слоистые композиты, конечные деформации, метод асимптотической гомогенизации, тензор напряжений Пиолы — Кирхгофа, градиент деформации, универсальные модели определяющих соотношений.

### **Литература**

1. Димитриенко Ю.И. Механика сплошной среды. Т. 2. Универсальные законы механики и электродинамики сплошной среды. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 560 с.
2. Димитриенко Ю.И. Механика сплошной среды. Т. 4. Основы механики твердого тела. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 624 с.
3. Димитриенко Ю.И., Губарева Е.А., Кольжанова Д.Ю. Моделирование слоистых композитов с конечными деформациями методом асимптотической гомогенизации // Инженерный журнал: наука и инновации, 2015, вып. 5. DOI: 10.18698/2308-6033-2015-5-1405

## **Modeling of deformation of layered composite materials with finite strains based on universal constitutive relations**

Yu.I. Dimitrienko, S.B. Karimov, D.Yu. Kolzhanova

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: dimit.bmstu@gmail.com, sunnat49@yandex.ru, darya.kolzhanova@yandex.ru

The results of developing a model of deformation of layered composites are presented using finite deformations according to the characteristics of individual layers. A variant of the asymptotic homogenization method for layered composites with finite strains and periodic structure is proposed. The method allows one to calculate effective strain diagrams of layered composites of layered composites with finite strains, connecting the components of the averaged Piola — Kirchhoff stress tensors and the strain gradient. Numerical calculations were performed for models of nonlinear elastic media with finite strains using universal models of defining relations for the case of compressible and incompressible composite layers.

**Keywords:** *layered composites, finite strains, asymptotic homogenization method, Piola-Kirchhoff stress tensor, strain gradient, universal models of defining relations.*

### **References**

1. Dimitrienko Yu.I. *Continuum Mechanics. Vol. 2. Universal laws of continuum mechanics and electrodynamics*. Moscow, BMSTU Publ., 2011, 560 p.
2. Dimitrienko Yu.I. *Continuum Mechanics. Vol. 4. Fundamentals of solid mechanics*. Moscow, BMSTU Publ., 2013, 624 p.
3. Dimitrienko Yu.I., Gubareva E.A., Kolzhanova D.Yu. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2015, iss. 5. DOI: 10.18698/2308-6033-2015-5-1405

## **Моделирование течений неньютоновских жидкостей в композитных периодических пористых многоканальных структурах**

Ю.И. Димитриенко, Шугуан Ли

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: dimit.bmstu@gmail.com, shuguangli2008@gmail.com

Жидкое связующее в композиционных материалах, как правило, наполнено различными добавками (ускорителями затвердевания, модификаторами, наночастицами, повышающими деформационные свойства композита), в результате такие связующие проявляют неньютоновские свойства. Исследование неньютоновских эффектов течения жидких смол в композитах в настоящее время практически

очень мало изучено. Настоящая работа посвящена разработке численного алгоритма решения задач течения неньютоновских связующих в композитных микрокаркасах. Проведено многомасштабное моделирование течений жидких связующих, проявляющих неньютоновские свойства, в композитных пористых структурах. Моделирование основано на методе асимптотической гомогенизации [1–3], с помощью которого сформулирована так называемая локальная задача течения жидкости. Для численного решения используется итерационный метод линеаризации задачи в сочетании с методом конечных элементов. Представлены некоторые результаты численного моделирования течения неньютоновского связующего в ячейке периодичности. Для решения локальных задач течения неньютоновской жидкости применен метод конечных элементов.

**Ключевые слова:** неньютоновская вязкость, метод асимптотических гомогенизации, композитная структура, метод конечных элементов.

#### Литература

1. *Dimitrienko Yu.I., Dimitrienko I.D., Sborschikov S.V.* Multiscale Hierarchical Modeling of Fiber Reinforced Composites by Asymptotic Homogenization Method // Applied Mathematical Sciences, 2015, vol. 9, no. 145, pp. 7211–7220.
2. *Dimitrienko Yu.I.* Nonlinear continuum mechanics and large inelastic deformations. Springer, 2010, 747 p.
3. *Dimitrienko Yu.I.* Thermomechanics of composites under high temperatures. Springer, 2015, 434 p.
4. *Dimitrienko Yu.I., Dimitrienko I.D.* Simulation of local transfer in periodic porous media // European Journal of Mechanics/B-Fluids, 2013, vol. 37, pp. 174–179.

## Modeling of flows of non-Newtonian fluids in composite periodic porous multichannel structures

Yu.I. Dimitrienko, Shuguan Lee

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: dimit.bmstu@gmail.com, shuguangli2008@gmail.com

The liquid binder in composite materials is usually filled with various additives (hardening accelerators, modifiers, nanoparticles that increase the deformation properties of the composite), as a result, such binders exhibit non-Newtonian properties. The study of non-Newtonian effects of the flow of liquid resins in composites is currently very little studied. The present work is devoted to the development of a numerical algorithm for solving the problems of the flow of non-Newtonian binders in composite microframes. Multiscale modeling of flows of liquid binders exhibiting non-Newtonian properties in composite porous structures has been carried out. The simulation is based on the asymptotic homogenization method [1–3], with

the help of which the so-called local fluid flow problem is formulated. For a numerical solution, an iterative method of linearizing the problem in combination with the finite element method is used. Some results of numerical simulation of the flow of a non-Newtonian binder in a periodicity cell are presented. To solve local problems of non-Newtonian fluid flow, the finite element method is used.

**Keywords:** *non-Newtonian viscosity, asymptotic homogenization method, composite structure, finite element method.*

#### References

1. Dimitrienko Yu.I., Dimitrienko I.D., Sborschikov S.V. Multiscale Hierarchical Modeling of Fiber Reinforced Composites by Asymptotic Homogenization Method. *Applied Mathematical Sciences*, 2015, vol. 9, no. 145, pp. 7211–7220.
2. Dimitrienko Yu.I. *Nonlinear continuum mechanics and large inelastic deformations*. Springer, 2010, 747 p.
3. Dimitrienko Yu.I. *Thermomechanics of composites under high temperatures*. Springer, 2015, 434 p.
4. Dimitrienko Yu.I., Dimitrienko I.D. Simulation of local transfer in periodic porous media. *European Journal of Mechanics/B-Fluids*, 2013, vol. 37, pp. 174–179.

### **Микромеханическое моделирование деформирования и разрушения полимерных композиционных материалов при высоких температурах**

Ю.И. Дмитриенко, С.В. Сборщиков, Ю.В. Юрин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: dimit.bmstu@gmail.com, servasbor@gmail.com, yvyurin@yandex.ru

С помощью метода многомасштабной гомогенизации разработана модель высокотемпературного деформирования и разрушения полимерных композиционных материалов на тканевых структурах армирования с учетом процессов термодеструкции. Численное моделирование осуществляется путем конечно-элементного решения серий локальных задач на ячейках периодичности двух структурных уровней. Проведены расчеты полей тензоров концентрации напряжений в матрицах и наполнителях. Для расчета прочностных характеристик композитов применен новый критерий прочности матрицы и наполнителей при многоосном напряженном состоянии, учитывающий существенное различие свойств при растяжении и сжатии. Проведено численное исследование процессов микроразрушения композитов вплоть до полного разрушения при различных программах нагрева.

**Ключевые слова:** *композиты, микроразрушение, численное моделирование, метод конечных элементов, метод многоуровневой гомогенизации, критерий прочности, высокие температуры.*



## Литература

1. *Dimitrienko Yu.I., Yakovlev D.O.* The Asymptotic Theory of Thermoelasticity of Multilayer Composite Plates. *Composites: Mechanics, Applications // An International Journal*. 2015. Vol. 6 (1). Pp. 13–51.
2. *Dimitrienko Yu.I.* *Thermomechanics of Composites Structures under High Temperatures* Springer, 2015. 367 p.
3. *Dimitrienko Yu.I., Yurin Yu.V.* Finite Element Modeling of Damage and Durability of Composite Structures with Local Delaminations // *Mathematical Modeling and Computational Methods*. 2017. Vol. 3, pp. 49–70.

## Micromechanical modeling of deformation and fracture of polymer composite materials at high temperatures

Yu.I. Dimitrienko, S.V. Sborschikov, Yu.V. Yurin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: dimit.bmstu@gmail.com, servasbor@gmail.com, yvyurin@yandex.ru

Using the method of multiscale homogenization, a model of high-temperature deformation and fracture of polymer composite materials on tissue reinforcement structures was developed, taking into account thermal decomposition processes. Numerical modeling is carried out by finite element solution of a series of local problems on periodicity cells of two structural levels. The fields of stress concentration tensors in matrices and fillers are calculated. To calculate the strength characteristics of the composites, a new criterion is used for the strength of the matrix and fillers in a multiaxial stress state, taking into account a significant difference in tensile and compression properties. A numerical study of the microdestruction processes of composites up to complete destruction under various heating programs was carried out.

**Keywords:** *composites, microdestruction, numerical modeling, finite element method, multilevel homogenization method, strength criterion, high temperatures.*

## References

1. *Dimitrienko Yu.I., Yakovlev D.O.* The Asymptotic Theory of Thermoelasticity of Multilayer Composite Plates. *Composites: Mechanics, Applications. An International Journal*, 2015, vol. 6 (1), pp. 13–51.
2. *Dimitrienko Yu.I.* *Thermomechanics of Composites Structures under High Temperatures*. Springer, 2015, 367 p.
3. *Dimitrienko Yu.I., Yurin Yu.V.* Finite Element Modeling of Damage and Durability of Composite Structures with Local Delaminations. *Mathematical Modeling and Computational Methods*, 2017, vol. 3, pp. 49–70.

## Моделирование процессов фильтрации жидкого связующего в композитных структурах с использованием технологии RTM-метода

Ю.И. Димитриенко, И.О. Богданов, Ю.В. Захарова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: dimit.bmstu@gmail.com, biofamily\_7394@mail.ru

Исследование процессов течения жидкостей в пористых композитных структурах при RTM-методе изготовления, как правило, осуществляется в рамках феноменологической теории фильтрации, в основе которой лежит закон Дарси. В этом случае коэффициенты проницаемости пористой среды определяются либо экспериментально, либо с помощью различных эмпирических и приближенных соотношений для описания локальных процессов фильтрации. В этом случае получаются довольно грубые оценки реальных процессов, происходящих внутри пор со сложной геометрией, что приводит к большим отклонениям при определении проницаемости. В работе представлены результаты исследований процессов фильтрации на основе метода асимптотического осреднения [1, 2]. Рассматривается трехмасштабное моделирование фильтрации слабосжимаемого жидкого связующего в тканевом материале наполнителя при производстве композиционных материалов на основе метода RTM. Методика основана на применении метода асимптотического осреднения системы уравнений Навье — Стокса. Получены конечно-элементные решения локальных задач фильтрации для различных типов микроструктур композитов. Проведен анализ влияния различных структур каркасов на характеристики проницаемости композиционных материалов.

**Ключевые слова:** теория фильтрации, пористые среды, метод асимптотического осреднения, метод конечных элементов, тензор проницаемости, система уравнений Навье — Стокса.

### Литературы

1. *Dimitrienko Yu.I., Bogdanov I.O.* Two-scale modeling of spatial flows of gas and weakly compressible liquid in porous composite structures // J. of Physics: Conference Series, 2018. Vol. 1141 (1). 012099.
2. *Dimitrienko Yu.I., Dimitrienko I.D.* Simulation of local transfer in periodic porous media // European J. of Mechanics — B-Fluids, 2013. Vol. 1. Pp. 174–179.

## Modeling of liquid binder filtration processes in composite structures using technology RTM method

Yu.I. Dimitrienko, I.O. Bogdanov, Yu.V. Zakharova

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: dimit.bmstu@gmail.com, biofamily\_7394@mail.ru

Investigation of the processes of fluid flow in porous composite structures using the RTM manufacturing method is usually carried out in the framework of the phenomenological theory of filtration, which is based on Darcy's law. In this case, the permeability coefficients of the porous medium are determined either experimentally or using various empirical and approximate relationships to describe local filtration processes. In this case, rather rough estimates of the real processes occurring inside the pores with complex geometry are obtained, which leads to large deviations in the determination of permeability. The paper presents the results of studies of filtration processes based on the method of asymptotic averaging [1, 2]. A three-scale modeling of filtration of a slightly compressible liquid binder in a filler fabric material is considered in the production of composite materials based on the RTM method. The technique is based on the application of the method of asymptotic averaging of the Navier-Stokes system of equations. Finite-element solutions of local filtration problems for various types of microstructures of composites are obtained. The analysis of the influence of various framework structures on the permeability characteristics of composite materials.

**Keywords** *filtration theory, porous media, asymptotic averaging method, finite element method, permeability tensor, Navier — Stokes system of equations.*

### References

1. Dimitrienko Yu.I., Bogdanov I.O. Two-scale modeling of spatial flows of gas and weakly compressible liquid in porous composite structures. *J. of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1141 (1). 012099.
2. Dimitrienko Yu.I., Dimitrienko I.D. Simulation of local transfer in periodic porous media. *European J. of Mechanics — B-Fluids*, 2013, vol. 1, pp. 174–179.

## **The Spectrum of the turbulence based on theory of stochastic equations and equivalence of measures**

A.V. Dmitrenko<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Thermal Physics, National Research Nuclear University «МЭФТИ»,  
Kashirskoye shosse 31, Moscow, 115409, Russia

<sup>2</sup>Department of Thermal Engineering, Russian University of Transport «МИИТ»,  
Obraztsova Street 9, Moscow, 127994, Russia  
E-mail: AVDmitrenko@mephi.ru, ammsv@yandex.ru

The formation of the spectrum of turbulence in the inertial interval on the basis of the new theory of stochastic hydrodynamics is presented. This theory is based on the theory of stochastic equations of continuum laws and equivalence of measures between random and deterministic movements. The purpose of the article is to present a solution based on these stochastic equations for the formation of the turbulence spectrum in the inertial interval in the form of the spectral function  $E(k)$  depending on wave numbers  $k$  in form  $E(k) \sim kn$ . The results of analytical solutions showed a satisfactory correspondence of the obtained dependence with the classical Kolmogorov's dependence in the form of  $E(k) \sim k^{5/3}$ .

## **Научный консультант в КБ-1. К 100-летию со дня рождения К.С. Колесникова**

Л.В. Докучаев

АО «ЦНИИмаш», Королёв, Россия  
E-mail: doklev@mail.ru

После защиты кандидатской диссертации по шимми колес автомобиля 35-летний К.С. Колесников с подачи его научного руководителя В.И. Феодосьева приходит в НИИ-88 заниматься вопросами ракетной техники. С.П. Королёв берет его научным консультантом в свое КБ-1 для работы по совместительству. Перед молодым ученым он ставит задачу — разобраться и дать рекомендации по исключению вредного влияния колебаний жидкого топлива на работу системы управления полетом ракеты. Константин Сергеевич тщательно изучает работы Г.С. Нариманова, Н.Н. Моисеева, Б.И. Рабиновича, принимает активное участие в работах «аварийных» комиссий. Вплотную сталкивается с возникшей проблемой неустойчивых упругих продольных колебаний Р-7. Его исследования позволяют грамотно подойти к обеспечению устойчивости движения четырехступенчатой жидкостной ракеты-носителя пакетной схемы с автономной системой управления, получившей название «Молния». В МВТУ им. Н.Э. Бау-

мана он обучает студентов не только по фундаментальным дисциплинам, но и знакомит с проблемами динамики ракет. Его издания по этой теме стали настольными книгами не только для студентов, но и для инженеров в ракетно-космической отрасли.

**Ключевые слова:** динамика, ракета, колебания, устойчивость.

## Scientific Consultant at KB-1. On the centenary of the birth of K.S. Kolesnikov

L.V. Dokuchaev

TsNIImash JSC, Korolev, Russia

E-mail: doklev@mail.ru

After defending his PhD thesis of shimmy of wheels of a car, 35-year-old K.S. Kolesnikov with the submission of his supervisor V.I. Feodosiev comes into NII-88 to deal with issues of rocket technology. S.P. Korolev takes him as a scientific consultant in his KB-1 for part-time work. To the young scientists he sets the task — to understand and give recommendations on eliminating the harmful effects of liquid fuel fluctuations on the operation of the missile flight control system. Konstantin Sergeevich carefully studies the work of G.S. Narimanov, N.N. Moiseev, B.I. Rabinovich, takes an active part in the work of ‘emergency’ commissions. He tightly faces with the problem of unstable elastic longitudinal vibrations R-7. His research dynamics allows a competent approach to ensuring the stability of the movement of a 4-stage liquid launch vehicle of a packet scheme with an autonomous control system, called the "Lightning". At BMHTS, he teaches students not only in fundamental disciplines, but also introduces the problems of rocket. His publications on this topic have become reference books not only for students, but also for engineers in the rocket and space industry.

**Keywords:** dynamics, rocket, vibrations, stability.

## Экспериментальное решение задачи Букуа

А.А. Домнышев<sup>1</sup>, В.А. Калиниченко<sup>1,2</sup>, П.М. Шкапов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

E-mail: domnyyshevaa@student.bmstu.ru; kalin@ipmnet.ru; spm@bmstu.ru

Целью представленной работы является экспериментальное решение следующей классической задачи, сформулированной Г. Букуа еще в 1812 г. — подъем под действием постоянной вертикальной силы однородной цепи, лежащей в свернутом виде на горизонтальной плоско-

сти. Если аналитическое решение этой задачи, основанное на теории систем переменной массы, можно найти в работах Г. Букуа (1814), Г.К. Михайлова (1974), Я.Г. Пановко (1985) и V. Sima (2005), то результаты экспериментов о движении такой цепи не публиковались.

В настоящих экспериментах использовалась оригинальная методика, согласно которой движение цепи исследовалось в воде, а в качестве постоянной силы служила сила плавучести поплавка, прикрепленного к концу цепи. Используемая постановка опытов позволила выявить затухающий характер колебаний системы поплавков–цепочка при смещении системы относительно равновесного положения. Для интерпретации данных эксперимента использовалось классическое решение задачи Букуа. Дифференциальное уравнение движения цепи как системы с переменной массой под действием постоянной силы решено численными методами. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных данных. Обсуждаются используемые для получения уравнения движения допущения, принятые в механике цепей.

**Ключевые слова:** задача Букуа, цепь, система переменной массы, уравнение Мещерского, сила плавучести, затухающие колебания, сопротивление жидкости.

## **Experimental solution of Buquoy's problem**

A.A. Domnyshev<sup>1</sup>, V.A. Kalinichenko<sup>1,2</sup>, P.M. Shkapov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Ishlinskii Institute for Problems in Mechanics

of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: domnyyshevaa@student.bmstu.ru; kalin@ipmnet.ru; spm@bmstu.ru

The aim of the present study is an experimental solution to the classical problem formulated by G. Buquoy back in 1812 — lifting under the action of a constant vertical force of a homogeneous chain lying in a folded form on a horizontal plane. An analytical solution to this problem, based on the theory of variable mass systems, can be found in the works of G. Buquoy (1814), G.K. Mikhailov (1974), Y.G. Panovko (1985) and V. Sima (2005), however, the results of experiments on the motion of such a chain were not published.

In present experiments, an original technique was used, according to which the chain motion was studied in water, and the buoyancy force of the float attached to the end of the chain served as a constant force. The used experimental setup allowed us to identify the damped nature of the vibrations of the float and chain system when the system is shifted relative to the equilibrium position. To interpret the experimental data, we used the classical solution of the Buquoy's problem. The differential equation of

chain motion as a system with variable mass under the action of constant force is solved by numerical methods. A comparison of theoretical and experimental data was conducted. The assumptions used to obtain the equations of motion, accepted in mechanics of chains, are discussed.

**Keywords:** *the Buquoy's problem, chain, variable mass system, the Meshchersky's equation, buoyancy force, damped oscillations, fluid resistance.*

## **Влияние сухого трения в узлах конструкции на динамику шарнирной ветроустановки**

М.З. Досаев, Л.А. Климина, Е.С. Шалимова

НИИ механики МГУ, Москва, Россия  
E-mail: klimina@imec.msu.ru

Построена модель динамики малогабаритной кривошипно-шатунной ветроустановки, учитывающая сухое трение в ползуне механизма. Описана зависимость характеристик установившихся рабочих режимов системы от параметров модели. Показано наличие эффекта гистерезиса механической мощности на рабочем режиме в зависимости от направления изменения значения коэффициента, характеризующего внешнюю электрическую нагрузку в локальной цепи генератора ветроустановки.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-08-01366).*

**Ключевые слова:** *ветроэнергетическая установка, кривошипно-шатунный механизм, механическая мощность.*

## **Influence of dry friction in joints upon dynamics of a hinge-mechanism-type wind power unit**

M.Z. Dosaev, L.A. Klimina, E.S. Shalimova

Institute of Mechanics of Lomonosov MSU, Moscow, Russia  
E-mail: klimina@imec.msu.ru

The mathematical model of a small-scale slider-crank wind power unit is constructed. Dry friction in the slider is taken into account. Characteristically features of operation modes of the unit are described depending on the parameters of the model. The effect of hysteresis of the trapped power with respect to the direction of changing of the electrical load coefficient is described.

*This work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 17-08-01366.*

**Keywords:** *wind power unit, slider-crank mechanism, trapped power.*

## Равновесие тела на опорах на шероховатой плоскости

М.З. Досаев, В.А. Самсонов

НИИ механики МГУ, Москва, Россия

E-mail: dosayev@imec.msu.ru

Рассматривается механическая система, состоящая из твердого тела и двух невесомых стержней, соединенных с телом посредством пружин. Стержни опираются на шероховатую горизонтальную поверхность. Контакт стержней с плоскостью описывается с помощью закона Гука. К телу приложена постоянная горизонтальная сила. Найдено положение равновесия системы и определены реакции. Показано, что нормальная реакция «задней ноги» превышает нормальную реакцию «передней». С уменьшением коэффициента трения система начинает движение с «задней ноги», которая начинает скольжение в направлении приложенной внешней силы, приближаясь к «передней».

**Ключевые слова:** сила трения, условия равновесия, реакция опоры.

## Balance of a body with supports on a rough plane

M.Z. Dosaev, V.A. Samsonov

Institute of Mechanics of Lomonosov MSU, Moscow, Russia

E-mail: dosayev@imec.msu.ru

A mechanical system consisting of a solid body and two weightless rods connected to the body by means of springs is considered. The rods are in resting contact upon a rough horizontal surface. The contact of the rods with the plane is described using Hooke's law. A constant horizontal force is applied to the body. The equilibrium position of the system is found and support reactions are determined. It was shown that the normal reaction of the “rear leg” exceeds the normal reaction of the “front” one. With a decrease in the coefficient of friction, the system begins to move from the “rear leg”, which begins to slip in the direction of the applied external force, approaching the “front” one.

**Keywords:** friction force, balance conditions, support reaction.



## **Новая конструкция механизма газораспределения двигателя внутреннего сгорания на основе мехатроники**

С.С. Драгунов, И.В. Меркурьев

НИУ «МЭИ», Москва, Россия

E-mail: sergejdragunov@yandex.ru, merkuryeviv@ya.ru

На современном этапе развития техники прорывными и инновационными являются решения на основе мехатроники. Новое конструктивное решение весьма актуально, поскольку позволяет существенно улучшить характеристики ДВС поршневого типа. Объектом исследования является мехатронный механизм поворота дискового золотника, совершающий колебательные движения синхронно с частотой вращения коленчатого вала. Поставлена задача — золотник должен перекрывать впускное и выпускное отверстие, когда поршень находится в ВМТ на всех режимах работы. Результаты работы представлены в виде методики расчета жесткости возвратных пружин и конструкции механизма изменения угла их закрутки. В качестве примера использован одноцилиндровый двигатель.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по гранту № 19-08-00367.*

**Ключевые слова:** мехатроника, колебания, механизм газораспределения, двигатель внутреннего сгорания.

## **The new construction of the mechanism of a valve train of an internal combustion engine on the basis of mechatronics**

S.S. Dragunov, I.V. Merkuriev

National research university «MPEI», Moscow, Russia

E-mail: sergejdragunov@yandex.ru, merkuryeviv@ya.ru

At the present stage of technological development, solutions based on mechatronics are breakthrough and innovative. The new design solution is very relevant, because it can significantly improve the characteristics of the internal combustion engine piston type. The object of the study is the mechatronic rotation mechanism of the slide valve, oscillating in synchronism with the rotational speed of the crankshaft. The task is set — the slide valve must block the inlet and outlet when the piston is in TDC at all operating modes. The results are presented in the form of methods for calculating the stiffness of the return springs and the design of the mechanism for changing the angle of their twists. A single-cylinder engine is used as an example.

*This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research under grant No. 19-08-00367.*

**Keywords:** *mechatronics, oscillations, gas distribution mechanism, internal combustion engine.*

## **Оценка конечных деформаций резиноподобных материалов**

Т.Б. Дуйшеналиев<sup>1</sup>, И.В. Меркурьев<sup>1</sup>, Р.Н. Аскарбеков<sup>2</sup>, В.Э. Цой<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИУ «МЭИ», Москва, Россия

<sup>2</sup> КГТУ им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызстан

E-mail: DuyshenaliyevT@mpei.ru, merkuryeviv@mpei.ru

В работе рассматриваются конечные (геометрически нелинейные) упругие деформации резиноподобных материалов. Такие деформации описываются математической моделью, разработанной на основе решения краевых задач статики в неклассической постановке.

Приводятся формулы по определению конечных деформаций упругих тел на основе элементов пространственного и материального градиентов перемещений. Дается сравнение определений по этим двум подходам. Подтверждается правомочность приведенных выводов на примере одномерного, двумерного и трехмерного преобразований в системе Mathcad.

**Ключевые слова:** *конечные деформации, перемещения, градиент перемещения, пространственные и материальные координаты, краевая задача.*

## **Evaluation of the final deformations of rubber-like materials**

T.B. Duishenaliyev<sup>1</sup>, I.V. Merkuryev<sup>1</sup>, R.N. Askarbekov<sup>2</sup>, V.E. Tsoi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National research university «MPEI», Moscow, Russia

<sup>2</sup> KSTU named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan

E-mail: DuyshenaliyevT@mpei.ru, merkuryeviv@mpei.ru

In this work the finite (geometrically nonlinear) elastic deformations of rubber-like materials are considered. Such deformations are described by a mathematical model, developed on the basis of solutions to boundary-value problems of statics in a non-classical formulation.

The formulas for determining the finite deformations of elastic bodies based on the elements of spatial and material displacement gradients are given. A comparison of definitions for these two approaches is given. The validity of the above conclusions is confirmed through the example of

one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional transformations in the Mathcad system.

**Keywords:** *finite deformation, displacements, displacement gradient, spatial and material coordinates, boundary value problem.*

## **Колебания системы перераспределения топлива в РН с однокомпонентным ЖРД**

М.И. Дьяченко

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: s\_masyanya@mail.ru

Одним из возможных путей улучшения энергетических характеристик ракет-носителей (РН) тяжелых классов является повышение весовой эффективности конструкции второй ступени за счет перераспределения части топлива из баков первой ступени. Перераспределение топлива может быть осуществлено перепадом давления между баками боковых блоков и баком центрального блока за счет давления в газовых подушках или за счет работы бустерных насосов, устанавливаемых в нижних частях баков центрального блока [1].

Данная работа посвящена исследованию динамических процессов в упрощенной математической модели многоступенчатой РН на активном участке траектории.

Математическая модель включает в себя систему гидродинамических уравнений, описывающих динамические процессы в агрегатах и элементах РН как в системе с сосредоточенными параметрами [2], и представляет собой систему линеаризованных дифференциальных уравнений второго порядка.

В работе определены главные частоты колебаний топлива в системе перераспределения и исследована проблема устойчивой работы системы перераспределения при продольных колебаниях РН.

**Ключевые слова:** *перераспределение топлива, продольные колебания, главные частоты, устойчивость.*

### **Литература**

1. Дьяченко М.И., Темнов А.Н. Проблемы динамики перераспределения топлива в крупногабаритных ракетно-космических объектах // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. Вып. 8. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-8-457
2. Колесников К.С. Динамика ракет. Москва: Машиностроение, 2003. 520 с.

## Vibrations of the fuel redistribution system in a run with a one-component Ire

M.I. Dyachenko

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: s\_masyanya@mail.ru

One of the ways to improve the power budget of modern heavy-class launch vehicle is to increase the weight efficiency due to the transfer of fuel from one rocket stage tank to another and provide a more complete filling at the separation moment.

The redistribution of fuel can be carried out by a pressure differential between the tanks of the side blocks and the tank of the central unit due to the pressure in the gas cushions or due to the operation of booster pumps installed in the lower parts of the tanks of the central block [1].

This work is devoted to the study of dynamic processes in a simplified mathematical model of multi-stage launch vehicles in the active part of the trajectory. The mathematical model includes a system of hydrodynamic equations that describe dynamic processes in aggregates and LV elements as in a system with lumped parameters [2], and is a system of linearized second-order differential equations.

The main frequencies of fuel vibrations in the redistribution system are determined and the problem of the stable operation of the redistribution system with longitudinal LV oscillations is investigated.

**Keywords:** *fuel redistribution, longitudinal vibrations, principal frequencies, stability.*

### References

1. D'yachenko M.I., Temnov A.N. Problems of Fuel Redistribution Dynamics in Large-Sized Rocket and Space Objects. *Engineering Journal: Science and Innovations*, 2012, iss. 8. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-8-457
2. Kolesnikov K.S. *Dinamika raket* [Dynamics of Rockets]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 520 p.

## О некоторых подходах к решению задачи идентификации неровностей дорожного покрытия по показаниям инерциальных датчиков смартфона, установленного внутри движущегося автомобиля

П.А. Егоров, Ю.В. Болотин

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
E-mail: paul.egorov@icloud.com

Задача определения характеристик дорожного покрытия в настоящее время интенсивно исследуется. Большинство работ направлено на классификацию участков дорог по статистическим показателям, в то время как в данной работе основное внимание уделяется пространственно-временной локализации конкретных дорожных событий.

Исследование основано на интеграции методов науки о данных и механики для моделирования движения автомобиля. Для описания динамики автомобиля используется велосипедная модель автомобиля с четырьмя степенями свободы, включающая в себя независимые переднюю и заднюю вертикальные стойки подвески и жесткую раму между ними. Шина представляется в виде пружины, амортизатор — в виде пружины и демпфера.

Цель работы состоит в том, чтобы провести идентификацию продольных дорожных событий, встречающихся на пути движущегося автомобиля, по данным об ускорении вертикального смещения рамы автомобиля, вызванном этими событиями. В качестве таких событий можно рассматривать, например, ямы, лежащие полицейские и прочие локальные возмущения профиля дорожного покрытия с характерными продольными размерами меньше длины колесной базы автомобиля.

Для решения задачи идентификации в работе рассматривается ряд подходов, основанных на спектральном анализе инерциальных данных и применении машинного обучения: как с учителем, так и без. Обучение с учителем выполняется для сверточных нейронных сетей на обучающей выборке, основанной на наборе спектрограмм/скалограмм вертикального канала ускорения реакции механической системы на модельный профиль дороги. Подход, не использующий обучение с учителем, основан на поиске моментов разладки в спектральных данных этого же канала.

В качестве основного результата работы представляется сравнение разных подходов на экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** идентификация дорожного покрытия, велосипедная модель автомобиля, спектральный анализ, инерциальные датчики, спектрограммы, скалограммы, машинное обучение, нейронные сети.

## **Approaches of solving the problem of identification of road surface irregularities according to the inertial sensors of a smartphone installed inside a moving car**

P.A. Egorov, Y.V. Bolotin

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: paul.egorov@icloud.com

The task of determining the road surface characteristics is currently being intensively studied. Most of the articles are aimed at the classification of road sections by statistical indicators, while this work focuses on the spatial and temporal localization of specific road events.

The study is based on the integration of data science and mechanics techniques to model vehicle movement. In order to describe the car's dynamics, a four-degree-of-freedom bicycle model is used, that incorporates independent front and rear vertical suspension struts and a rigid frame in between them. The tire is represented in the form of a spring, the shock absorber is in the form of a spring and a damper.

The goal of the work is to identify the longitudinal road events that occur in the path of a moving car, according to the acceleration of the vertical displacement of the car frame that is caused by these events. For such events, for example, pits, speed bumps and other local disturbances of the road surface profile with a characteristic longitudinal size less than the length of the wheelbase of the car can be looked at.

To solve the identification problem, the work considers a number of approaches that are based on spectral analysis of inertial data and the use of machine learning. Supervised learning is performed for convolutional neural networks on a training sample that is based on a set of spectrograms/scalograms of the vertical channel of acceleration of the mechanical system response on the model road profile. The unsupervised learning approach is based on finding points of difference in the spectral data of the same channel.

The main result of the work is a comparison of different approaches that are based on the experimental data.

**Keywords:** *road surface identification, Bicycle model of a car, spectral analysis, inertial sensors, spectrograms, scalograms, machine learning, neural networks.*

## Механика цевочного зацепления

О.В. Егорова, А.В. Гусев, Е.А. Козляева

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: tmm-olgaegorova@yandex.ru, gusevandre2015@yandex.ru, lizabu1801@mail.ru

На примере механизма из уникальной коллекции МГТУ им. Н.Э. Баумана рассмотрены вопросы изучения механики цевочного зацепления. Результатом исследования является изучение поведения механизма и изменения его характеристик. С помощью этого исследования можно проводить дополнительные расчеты, например на прочность цевок, и тем самым подбирать наиболее выгодные варианты для необходимого вида эксплуатации механизма. С помощью 3D-визуализации можно показать принцип работы даже при отсутствии самого механизма, что значительно облегчает понимание преподавателей и студентов в процессе обучения.

**Ключевые слова:** теория механизмов и машин, изучение механики цевочного зацепления, образовательные технологии.

## Cycloid gear mechanics

O.V. Egorova, A.V. Gusev, E.A. Kozlyueva

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: tmm-olgaegorova@yandex.ru, gusevandre2015@yandex.ru, lizabu1801@mail.ru

The article is devoted to the study of the pinion mechanisms. In it, we consider this topic on the example of a mechanism from a unique collection of MSTU N.E. Bauman. The result of the study is the study of the behavior of the mechanism and changes in its characteristics. With the help of our research, additional calculations can be carried out: for example, on the strength of the lugs, and thereby select the most advantageous options for the required type of operation of the mechanism. Our article is also educational in nature: using 3D visualization you can show the principle of work, even in the absence of the mechanism itself, which will greatly facilitate the understanding of teachers and students in this matter.

**Keywords:** theory of mechanisms and machines, the study of the cycloid gear mechanics, educational technology.

## Расчет удельной поверхностной энергии наночастиц алюминия

О.С. Еркович, В.Ю. Федорова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: erkovitch@mail.ru, fedorovavyu@gmail.com

Осуществлен численный расчет удельной поверхностной энергии сферически-симметричных наночастиц алюминия. Для описания частиц была использована модель желе (модель однородного фона). При моделировании свойств наночастиц была использована теория функционалов плотности (DFT).

Для расчета энергетических характеристик частиц был применен прямой вариационный метод Ритца. В работе рассматривались частицы, радиус которых лежит в пределах 1 нм — 10 нм, энергетические характеристики которых представляют наибольший интерес в практических приложениях.

Была исследована зависимость энергетических характеристик системы от значения удельной площади поверхности металлического нанопорошка.

Полученные результаты могут быть использованы при исследовании термических и механических свойств (деформация, твердость и т. д.) материалов, включающих металлические наночастицы, а также при исследовании свойств металлических нанопорошков.

**Ключевые слова:** наночастицы, алюминий, удельная поверхностная энергия, теория функционала плотности.

## Calculation of specific surface energy of aluminum nanoparticles

O.S. Erkovitch, V.Yu. Fedorova

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: erkovitch@mail.ru, fedorovavyu@gmail.com

The specific surface energy of spherically symmetric aluminum nanoparticles was numerically calculated. The jellium model (homogeneous background model) was used to describe the particles. The modeling of the nanoparticles properties was carried out by the density functional theory (DFT). To calculate the energy characteristics of the particles, the direct Ritz variational method was used. The work considers particles whose radius ranges from 1 nm to 10 nm. The dependence of the system energy characteristics on the specific surface area of metal nanopowders was investigated. The results can be used to study the thermal and mechanical



properties (deformation, hardness, etc.) of materials including metal nanoparticles, as well as to study the properties of metal nanopowders.

**Keywords:** *nanoparticles, aluminum, specific surface energy, density functional theory.*

## **Мягкая посадка при помощи парашютной системы с упругим звеном**

С.В. Журин

ОАО «НИИ парашютостроения», Москва, Россия  
E-mail: zhur\_serg@rambler.ru

Вниманию предлагается результаты летных экспериментов парашютной системы (ПС) с упругим звеном [1]. Отличительной особенностью нового типа ПС является наличие упругого звена для подвески груза к парашюту, а сам груз при этом разделяется на две части  $m_1$  и  $m_2$ , сопоставимые по массе и подвешиваемые одна под другой [2].

Предлагаемый тип ПС снижает влияние недостатков классических грузовых ПС: перегрузки при наполнении купола демпфируются упругим звеном; скорость снижения данного типа ПС не является посадочной скоростью полезного груза  $m_1$ , поэтому может заметно превышать скорость снижения большинства грузовых ПС; вертикальная скорость груза  $m_1$  в процессе посадки (после касания грузом  $m_2$  поверхности) гасится за счет действия упругого звена, сила упругости которого становится нескомпенсированной после того, как груз  $m_2$  коснулся поверхности; в определенный момент после касания груза  $m_2$  поверхности механизмом управления длиной троса происходит натяжение троса, и происходит «якорение» груза  $m_1$  грузом  $m_2$ , тем самым гасится горизонтальная составляющая скорости груза  $m_1$ .

Для подтверждения работоспособности и реализуемости предлагаемой концепции была спроектирована, изготовлена и испытана экспериментальная ПС.

Основные выводы.

1. Предложен новый тип ПС с упругим звеном и тандемным разделением груза на две части. Основной его особенностью является возможность обеспечить малые динамические перегрузки верхнего груза во время всего полета, включая посадку.

2. Реализуемость и работоспособность предлагаемого типа ПС показана на примере экспериментальной ПС с полетной массой  $\approx 10$  кг, в летном эксперименте динамическая перегрузка верхнего груза не превысила  $n = 5$ .

## Литература

1. Жури́н С.В. Парашютная система с упругим звеном и тандемным разделением груза на две части // Научный вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22, № 1. С. 29–38.
2. Белошицкий А.В., Жури́н С.В., Пахмутов П.А., Швед Т.Н. Пат. 2600028 РФ. Устройство для парашютной посадки груза на посадочную поверхность. Опубл. 22.09.2016.

## Soft landing using a parachute system with an elastic link

S.V. Zhurin

Joint Stock Company «Scientific and Research Institute  
of parachute Design and Production», Moscow, Russia  
E-mail: zhur\_serg@rambler.ru

Attention is given to the results of flight experiments of the parachute system (PS) with an elastic link. A feature of the new type of PS is the presence of an elastic link for the attachment of the cargo to the parachute, and the cargo itself is divided into two parts  $m_1$  and  $m_2$ , comparable in weight and suspended one under the other. The choice of the design parameters of the parachute system, it is possible to provide small dynamic overload on the top of the cargo in flight and during landing.

The proposed type of PS reduces the disadvantages of classic cargo PS:

- overload when inflate are damped by the elastic element;
- the rate of descent of this type of PS is not the landing speed of the payload  $m_1$ , so it can significantly exceed the rate of descent of most cargo PS;
- the vertical speed of the load  $m_1$  during landing (after touching the surface of the load  $m_2$ ) is reduced by the action of an elastic link, the elastic force of which becomes uncompensated after the load  $m_2$  touched the surface;
- after touching the surface of the cargo  $m_2$  cable length control mechanism tension occurs, and there is "anchoring" cargo  $m_1$  cargo  $m_2$ , thereby reduced horizontal component of the speed of the cargo  $m_1$ .

To confirm the efficiency and feasibility of the proposed concept was designed, manufactured and tested experimental PS.

Main conclusions.

1. The proposed new type of PS with the elastic element and the tandem split the cargo into two parts. Its main feature is the ability to provide small dynamic overload of the upper load during the entire flight, including landing.
2. The feasibility and performance of the proposed type of PS is shown by the example of an experimental PS with a flight mass of  $\approx 10$  kg, in the flight experiment, the dynamic overload of the upper load did not exceed  $n = 5$ .

## References

1. Zhurin S.V. The parachute system with the elastic link and the load divided into two parts as a tandem. *Civil Aviation High Technologies*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 29–38.
2. Beloshickij A.V., Zhurin S.V., Pahmutov P.A., Shved T.N. Pat. 2600028 RF. *Ustrojstvo dlya parashyutnoj posadki gruzu na posadochnuyu poverhnost'*. Publ. 22.09.2016 (in Russian).

## О методе оценки ресурса лопаточного аппарата газотурбинного двигателя при асимметричном циклическом нагружении

Э.Б. Завойчинская

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
E-mail: elen@altomira.ru

Одной из современных задач оценки безопасности эксплуатации турбин и компрессоров в газо- и паротурбостроении является исследование закономерностей стохастического процесса зарождения и развития усталостных микро- и макротрещин в конструкциях лопаточного аппарата при эксплуатационном нагружении. Проблема оценки ресурса работы лопаток связана с необходимостью изучать случайные процессы разрушения в областях многоциклового и гигациклового усталости. Усталостное разрушение охлаждаемых лопаток компрессоров и турбин вызывается в основном высоким уровнем осевых переменных напряжений в областях их концентрации (связанной со структурной неоднородностью материала, технологическими дефектами; коррозионными повреждениями, повреждениями в результате попадания посторонних предметов, разрушениями бандажных полок и др.), возникающих при их возможных резонансных вынужденных колебаниях, причинами которых являются турбулентные газовые потоки при вращении вала, парциальность подвода газа в цикле работы, неравномерность потока из сопловых каналов и др. Усталостным разрушениям наиболее подвержены турбинные и компрессорные лопатки авиационных газотурбинных двигателей, так как за цикл работы запуск — основной режим — остановка лопатка попадает на короткий период времени в условия вынужденных резонансных колебаний по одной из частот [1, 2].

Экспериментально обнаруживается, что микро- и макротрещины возникают перпендикулярно оси лопатки в корневом сечении в зоне концентрации напряжений от изгибных форм колебаний. В наиболее общем виде осевое напряжение в лопатке может быть представлено в виде суммы постоянной составляющей и дискретного спектра с набором амплитуд, шагом, равным частоте вращения диска, и сдви-

гами фаз между компонентами. В данной работе исследуется асимметричное одночастотное нагружение с постоянной составляющей, определяемой известным образом как максимальное значение суммы растягивающего напряжения от центробежных сил и изгиба от аэродинамических сил.

Метод оценки ресурса лопатки основывается на теории масштабного структурного разрушения [3–7], согласно которой стохастический процесс усталостного разрушения рассматривается на шести масштабных уровнях, отвечающих разным стадиям эволюции материала и физическим механизмам. Для вероятности разрушения лопатки на микро-, мезо- и макроуровнях при асимметричном одноосном нагружении строится иерархическая система определяющих соотношений, в которых в качестве переменной выбирается амплитуда напряжения, а материальные функции определяются по данным стандартных испытаний на усталостную прочность с учетом результатов физических исследований по развитию хрупких трещин. Рассматриваются материалы, имеющие предел выносливости, и материалы, у которых в области гигацикловой усталости предел усталости уменьшается с ростом числа циклов. В соответствии с известными критериями усталостной прочности выписываются зависимости материальных функций от параметра асимметрии цикла. Строятся кривые усталости лопатки по определенному уровню дефектности. Представляются результаты расчетов для лопатки из никелевого сплава ЖС6К в области многоциклового и гигациклового усталости. Определяются области развития дефектов, кривые усталости по образованию микротрещин, коротких и макротрещин при различных прогибах лопатки. Метод расчета подтверждается сравнением полученных результатов с известными данными по разрушению лопаток турбокомпрессоров.

**Ключевые слова:** *стохастические процессы усталостного разрушения, лопатка, вероятность разрушения, масштабные уровни разрушения, многоцикловая усталость, гигацикловая усталость, кривая усталости.*

### **Литература**

1. Шанявский А.А. Моделирование усталостных разрушений металлов. Уфа: «Монография», 2007. 500 с.
2. Шанявский А.А., Солдатенков А.П. // Физическая мезомеханика. 2019. Т. 22 (1). С. 44–53.
3. Завойчинская Э.Б. // Сб. трудов XII Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Уфа, 2019. № 3. С. 607–609.
4. Завойчинская Э.Б. // Сб.: «Современные проблемы математики и механики». Сер. Материалы Междунар. конф., посвященной 80-летию академика В.А. Садовниченко. Москва: ООО «МАКС Пресс», 2019. С. 694–697.

5. *Завойчинская Э.Б.* // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 1: Математика. Механика. 2019. Т. 1. С. 29–34.
6. *Завойчинская Э.Б.* // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. Т. 1. С. 76–85.
7. *Завойчинская Э.Б.* // Механика твердого тела. 2012. Т. 3. С. 54–77.

## **On a method for resource estimating the resource at asymmetric cyclic loading of a gas turbine engine blade**

E.B. Zavoychinskaya

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: elen@altomira.ru

One of the modern problems of operation safety of turbines and compressors in gas and steam turbine structures is to study the stochastic process of generation and growing of fatigue micro- and macrocracks in the structure elements of a blade apparatus under operational loading. The problem of resource estimating of the blades is associated with the necessary to investigate the random fracture processes of multicycle and gigacycle fatigue. Fatigue failure of cooled compressor and turbine blades is caused, in general, by a high level of axial cyclic stresses in the areas of their concentration (associated with material structural heterogeneity, technological defects, corrosion damage, damage by other objects, retaining shelve destruction etc.). The stresses occur during their possible forced resonance vibrations caused by turbulent gas flows during shaft rotation, partial gas supply to the working cycle, flow from nozzle channels, etc. Turbine and compressor blades of aircraft gas turbine engines are most susceptible to fatigue, because per cycle: start — main regime — stop, the blade falls for a short time period in the conditions of forced resonant oscillations at one of the frequencies [1, 2].

It is experimentally found micro- and macrocracks occur perpendicular to the axis of the blade in the root section in the zone of stress concentration from bending vibration modes. In general, the blade axial stress can be represented as the sum of the constant component and the discrete spectrum with a set of amplitudes, with a step equal to the disk rotation frequency, and phase differences between the components. Here asymmetric one-frequency loading with a constant component, defined in a known manner of the maximum value of the sum of tensile stress from centrifugal forces and bending from aerodynamic forces, is investigated.

The blade resource estimation method is based on the theory of scale-structural failure [3–7], according to which the stochastic process of fatigue failure is considered at six scale-structural levels corresponding to different stages of the material evolution and physical mechanisms. For the blade failure probability on the micro-, meso- and macrolevels at

asymmetric uniaxial loading, a hierarchical system of constitutive relations is constructed. The stress amplitude is selected as a variable and the material functions are determined according to standard fatigue tests taking into account the results of physical studies on the brittle crack growing. Here considered materials with an endurance limit and materials with the fatigue limit decreases with increasing number of cycles at gigacycle fatigue. In accordance with the well-known criteria of fatigue strength, the relations of material functions from asymmetry parameters are presented. The blade fatigue curves are given for a certain defect levels. The calculation results are presented for a ZhC6K nickel alloy blade at multicycle and gigacycle fatigue. Areas of defect growing, fatigue curves on microcracks, short and macrocracks at various deflections of a blade are determined. The calculation method is confirmed by comparing obtained results with known data on the compressor blade fatigue.

**Keywords:** *fatigue stochastic processes, blade, failure probability, failure scale-structural levels, multicycle fatigue, gigacycle fatigue, fatigue curve.*

#### References

1. Shaniavsky A.A. *Modeling of metal fatigue. Synergetics in aviation*. Ufa, Monograph Publ., 2007, 500 p.
2. Shaniavsky A.A., Soldatenkov A.P. *Physical Mesomechanics*, 2019, 22 (1), pp. 44–53.
3. Zavoychinskaya E.B. *Proc. XII All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, vol. 3, pp. 84–86.
4. Zavoychinskaya E.B. *Proc. Int. Sci. Conf. dedicated to the 80<sup>th</sup> anniversary of Academician V.A. Sadovnichy "Contemporary Problems of Mathematics and Mechanics"*. Moscow, LLC Max Press, 2019, pp. 694–697.
5. Zavoychinskaya E.B. *Moscow University Mechanics Bulletin*. Allerton Press Inc., US, 2019, 74.2, pp. 36–40.
6. Zavoychinskaya E.B. *J. of Machinery Manufacture and Reliability*, 2018, 47.1, pp. 72–80.
7. Zavoychinskaya E.B. *Mechanics of Solids*. Allerton Press Inc., US, 2012, 3, pp. 304–323.

## Математическое моделирование удара частиц о поверхность при получении порошковых покрытий

Е.А. Зотов, К.В. Небога

Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия  
E-mail: nebogakirill@yandex.ru, west0506@rambler.ru

Газотермические и газодинамические покрытия широко используются при защите поверхностей изделий машиностроения от неблагоприятных факторов среды в процессе эксплуатации и для придания им более высоких физико-механических свойств за счет применения

специальных материалов и технологических приемов в процессе послойного нанесения [1–5]. Данная группа методов применяется для получения слоистых покрытий без горизонтальных сквозных пор, что наиболее востребовано при решении проблем повышения теплозащиты и жаростойкости изделий.

Для обеспечения более высоких защитных свойств в таких покрытиях необходимо создать условия для образования однородных структур. Эта задача решается путем выбора оптимальных параметров технологии нанесения на основе анализа модельных представлений основных процессов получения. Процессы ускорения и нагрева частиц достаточно полно описаны в ряде источников, например [3, 4], однако моделирование процесса удара частиц требует более детального подхода с целью учета влияния основных факторов при образовании сплэтов покрытия. В работе получены аналитические соотношения для формы и размеров сплэта, продолжительности удара и степени пластической деформации в зависимости от скорости, температуры, формы, размеров и свойств частиц порошкового материала.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-0095919.*

**Ключевые слова:** *порошковые покрытия, математическое моделирование, удар частиц, сплэт, закономерности.*

## Литература

1. Барвинок В.А. Плазма в технологии, надежность, ресурс. Москва: Наука и технологии, 2005. 456 с.
2. Барвинок В.А., Богданович В.И. Физическое и математическое моделирование процесса формирования мезоструктурноупорядоченных плазменных покрытий // Журнал технической физики, 2012. Т. 82, вып. 2. С. 105–112.
3. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Mathematical modelling of powder material motion and transportation in high-temperature flow core during plasma coatings application // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327, Iss. 1, Article number 022036.
4. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Mathematical Model of Powder Material Particles Heating in Thermal Spraying // Key Engineering Materials. 2018. Vol. 769. Pp. 336–345.
5. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Metallographic Study of Mesostructure-Ordered Plasma Ceramic Coatings // Key Engineering Materials. 2017. Vol. 743. Pp. 118–123.

## Mathematical modeling of the particles impact on the surface in the preparation of powder coatings

E.A. Zotov, K.V. Neboga

Samara National Research University, Samara, Russia  
E-mail: nebogakirill@yandex.ru; west0506@rambler.ru

Gas-thermal and gas-dynamic coatings are widely used to protect the surfaces of engineering products from adverse environmental factors during operation and to give them higher physical and mechanical properties through the use of special materials and technological techniques in the process of layering [1–5]. This group of methods is used to obtain layered coatings without horizontal through pores, which is most in demand when solving problems of increasing thermal protection and heat resistance of products.

To ensure higher protective properties in such coatings, it is necessary to create conditions for the formation of homogeneous structures. This problem is solved by selecting the optimal parameters of the application technology based on the analysis of model representations of the main processes of production. The processes of acceleration and heating of particles are fully described in a number of sources, for example [3, 4], but the modeling of the particle impact process requires a more detailed approach in order to take into account the influence of the main factors in the formation of coating splats. Analytical relations for the shape and size of the splat, the duration of the impact and the degree of plastic deformation depending on the speed, temperature, shape, size and properties of the particles of the powder material are obtained.

*The reported study was funded by RFBR according to the research project No. 18-38-0095919.*

**Keywords:** powder coatings, mathematical modeling, particle impact, splat, regularities.

### References

1. Barvinok V.A. *Plasma in Technology: Reliability and Resource*. Moscow, Science and technology Publ., 2005, 456 p.
2. Barvinok V.A., Bogdanovich V.I. Physical and Mathematical Simulation of the Formation of Mesostructure-Ordered Plasma Coatings. *Technical physics*, 2012, vol. 57, iss. 2, pp. 262–269.
3. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Mathematical modelling of powder material motion and transportation in high-temperature flow core during plasma coatings application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327, iss. 1, Article number 022036.
4. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Mathematical Model of Powder Material Particles Heating in Thermal Spraying. *Key Engineering Materials*, 2018, vol. 769, pp. 336–345.



5. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Metallographic Study of Mesostructure-Ordered Plasma Ceramic Coatings. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 743, pp. 118–123.

## **Моделирование процесса образования сплэтов порошковых покрытий и разработка количественного критерия оценки их структуры**

Е.А. Зотов, К.В. Небога

Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия  
E-mail: west0506@rambler.ru, nebogakirill@yandex.ru

Порошковые покрытия, полученные газодинамическими и газотермическими методами, нашли широкое распространение при производстве различных изделий машиностроения [1–5]. Свойства покрытий существенно зависят от свойств и размеров порошковых частиц [1, 5], а также от параметров процесса нанесения [3, 4], определяющих время пребывания частиц в потоке, их скорости, траектории движения и температуру нагрева. Ввиду этих причин при моделировании возникновения отдельных сплэтов покрытия необходимо учитывать большое количество параметров.

В данной работе проведено математическое моделирование упругого и упругопластического удара частиц при закреплении на поверхности детали. Учитывались свойства порошкового материала, кинетическое и тепловое состояние частиц в момент удара с поверхностью детали. Под действием импульсного и напорного давления частица, форма которой близка к сферической, растекается по поверхности детали, образуя сплэт покрытия с характерными параметрами: толщиной и диаметром. Как показали результаты исследования, данные параметры предопределены в основном свойствами материала и параметрами процесса напыления, что позволяет управлять структурой покрытия в процессе получения. Кроме того, количественный критерий на основе соотношений этих параметров, легко устанавливаемых при анализе поперечных металлографических шлифов, позволяет дать более объективную оценку качества покрытия и его структуры, а также проводить более корректный сравнительный анализ разных образцов покрытия.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-0095919.*

**Ключевые слова:** порошковые покрытия, образование сплэта, структура, количественный критерий оценки.

## Литература

1. Барвинок В.А. Плазма в технологии, надежность, ресурс. Москва: Наука и технологии, 2005. 456 с.
2. Барвинок В.А., Богданович В.И. Физическое и математическое моделирование процесса формирования мезоструктурно упорядоченных плазменных покрытий // Журнал технической физики. 2012. Т. 82, вып. 2. С. 105–112.
3. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Enhancing thermal barrier coatings performance through reinforcement of ceramic topcoat // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 156, iss. 1. Article number 012016.
4. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Metallographic Study of Mesostructure-Ordered Plasma Ceramic Coatings // Key Engineering Materials. 2017. Vol. 743. Pp. 118–123.
5. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Analysis of the ceramic layer microstructure influence on plasma spray thermal barrier coating performance // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 286, iss. 1. Article number 012008.

## **Modeling of the powder coatings splats formation process and the development of quantitative criteria for assessing their structure**

E.A. Zotov, K.V. Neboga

Samara National Research University, Samara, Russia  
E-mail: west0506@rambler.ru, nebogakirill@yandex.ru

Powder coatings obtained by gas-dynamic and gas-thermal methods are widely used in the production of various engineering products [1–5]. The properties of coatings significantly depend on the properties and sizes of powder particles [1, 5], as well as on the parameters of the application process [3–4], which determine the residence time of particles in the flow, their speed, trajectory and heating temperature. Due to these reasons, a large number of parameters must be taken into account when modeling the appearance of individual coverage splats.

In this work mathematical modeling of elastic and elastic-plastic impact of particles at fastening on a surface of a detail is carried out. The properties of the powder material, kinetic and thermal state of the particles at the moment of impact with the surface of the part were taken into account. Under the action of pulse and pressure pressure, the particle, whose shape is close to spherical, spreads over the surface of the part, forming a splat coating with characteristic parameters: thickness and diameter. As shown by the results of the study, these parameters are predetermined mainly by the properties of the material and the parameters of the spraying process, which allows you to control the structure of the coating in the production process. In addition, a quantitative criterion based on the ratios of these parameters, easily established in the analysis of transverse metal-

lographic cuts, allows to give a more objective assessment of the quality of the coating and its structure, as well as to conduct a more correct comparative analysis of different samples of the coating.

*The reported study was funded by RFBR according to the research project No. 18-38-0095919.*

**Keywords:** powder coatings, splat formation, structure, quantitative evaluation criterion.

## References

1. Barvinok V.A. *Plasma in Technology: Reliability and Resource*. Moscow, Science and technology Publ., 2005, 456 p.
2. Barvinok V.A., Bogdanovich V.I. Physical and Mathematical Simulation of the Formation of Mesostucture-Ordered Plasma Coatings. *Technical physics*, 2012, vol. 57, iss. 2, pp. 262–269.
3. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Enhancing thermal barrier coatings performance through reinforcement of ceramic topcoat. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 156, iss. 1, Article number 012016.
4. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Metallographic Study of Mesostucture-Ordered Plasma Ceramic Coatings. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 743, pp. 118–123.
5. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Analysis of the ceramic layer microstructure influence on plasma spray thermal barrier coating performance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 286, iss. 1, Article number 012008.

## Изменчивость чандлеровского движения полюса

Л.В. Зотов<sup>1,2</sup>, К. Бизуар<sup>3</sup>, Н.С. Сидоренков<sup>4</sup>

<sup>1</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова, ГАИШ, Москва, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», МИЭМ, Москва, Россия

<sup>3</sup> Парижская обсерватория /SYRTE, Париж, Франция

<sup>4</sup> Гидрометцентр России, Москва, Россия

E-mail: wolftempus@gmail.com

В последние 10 лет мы провели работу, позволившую продвинуться в изучении чандлеровского колебания полюса Земли. В работе [1] мы восстановили возбуждение этой резонансной моды методом корректирующей фильтрации Пантелеева. Теперь есть уверенность, что такая фильтрация — регуляризирующий алгоритм и его параметры выбраны согласованно с погрешностями наблюдений и параметрами резонанса. В возбуждении обнаруживаются квази-20-летние амплитудные модуляции. В рамках дифференциального уравнения первого порядка, описывающего движение полюса, легко показать, что эти модуляции обуславливают 40-летние изменения амплитуды чандлеровского колебания и расщепление его спектральной линии. Простая

модель огибающей чандлеровского колебания, включающая 80 и 40-летние биения, объясняет его нынешнее затухание, подобное произошедшему в 1930-е годы, а также прогнозирует увеличение его амплитуды в ближайшие десятилетия с возможным скачком по фазе на 180 градусов. С другой стороны, геодезическое возбуждение чандлеровского движения полюса в последние 50 лет согласуется с океаническим и атмосферным возбуждением [2–4], доминирующим влиянием океана, по всей видимости, приводящим к 20-летним модуляциям. Их физической причиной могут быть климатические или приливные процессы, влияющие на его циркуляцию.

*Работа поддержана Китайской программой по инновационной инженерии в современной геодезии и геодинамике (грант NSFC №. B17033).*

### **Литература**

1. *Zotov L., Bizouard C., Shum C.K.* A possible interrelation between Earth rotation and climatic variability at decadal time-scale // *Geodesy and Geodynamics*. KeAi, China. 2016. Vol. 7, Iss. 3. Pp. 216-222. DOI:10.1016/j.geog.2016.05.005
2. *Zotov L., Bizouard C.* Regional atmospheric influence on the Chandler wobble // *Advances in Space Research*. 2015. Vol. 55, Iss. 5. Pp. 1300–1306. DOI: 10.1016/j.asr.2014.12.013
3. *Zotov L., Bizouard C.* Reconstruction of prograde and retrograde Chandler excitation // *Journal of Inverse and Ill-posed problems*. 2016. Vol. 24, Iss. 1. Pp. 99–105. DOI: 10.1515/jiip-2013-0085
4. *Зотов Л.В.* Исследование связей между вращением Земли и геофизическими процессами. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, МГУ, 2019. URL: <https://istina.msu.ru/dissertations/211744667/>

## **Оптимизация двухступенчатого центробежного насоса**

В.М. Зубанов, А.А. Волков, А.И. Корнеева

Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

E-mail: [waskes91@gmail.com](mailto:waskes91@gmail.com), [a44rey@gmail.com](mailto:a44rey@gmail.com), [akorneeva94@mail.ru](mailto:akorneeva94@mail.ru)

В работе апробирован метод доводки топливного насоса высокопроизводительного турбонасосного агрегата путем совместного использования программного обеспечения математической оптимизации IOSO, комплекса NUMECA и CFD программы ANSYS CFX. Программное обеспечение для оптимизации было использовано для автоматического изменения геометрии крыльчатки низкого давления, переходного канала и крыльчатки высокого давления для нахождения оптимальной конструкции. Необходимо было сохранить оригинальный вариант оставшихся частей насоса. По этой причине изме-

нялись только геометрические параметры лопаток без изменения контуров меридиональной части потока насоса.

Создание сетки лопаточных частей (роторы и переходный канал статора) выполнялось с использованием NUMECA AutoGrid5. Для упрощения расчетов использовались секторные модели. Был рассмотрен поток вокруг только одной лопатки. Настройка и решение задачи были выполнены в решателе ANSYS CFX. Сравнение расчетных характеристик основного насоса с экспериментальными данными было выполнено до оптимизации.

Проведен анализ характеристик для полученной оптимизированной геометрии насоса. Было установлено, что насос с оптимизированной геометрией имеет на 3 % больший КПД при сохранении напора по сравнению с исходным вариантом насоса. Полученный запас можно использовать для форсирования ракетного двигателя и/или для снижения нагрузки на основную турбину, которая работает в агрессивной окислительной среде.

**Ключевые слова:** *иннекоцентрострежный насос, лопатка, оптимизация.*

## Optimization of two-stage centrifugal pump

V.M. Zubanov, A.A. Volkov, A.I. Korneeva

Samara National Research University, Samara, Russia

E-mail: waskes91@gmail.com, a44rey@gmail.com, akorneeva94@mail.ru

The paper tested a refining method for a fuel pump of rocket powerful turbo-pump unit by the joint usage of mathematical optimization software IOSO, meshing complex NUMECA and CFD complex ANSYS CFX. The optimization software was used for automatic change of the geometry of low-pressure impeller, transition duct and high-pressure impeller to find the optimal design. It was mandatory to keep the original variant of the remaining parts of the pump. For this reason, only geometrical parameters of the blades were varied without changing the contours of the pump meridional flow part.

Creation of vane unit mesh (rotors and stator transition duct) was performed using NUMECA AutoGrid5. Sector models were used for the calculation simplification. The flow around only one blade or screw was considered. Setting up and solution of the task were carried out in the ANSYS CFX solver. Comparison of calculated characteristics of the basic pump with the experimental data was performed before the optimization.

The analysis of characteristics for the obtained optimized pump geometry was carried out. It was found that pump with optimized geometry has a 3 % greater efficiency while maintaining the head comparison with the original pump variant. The obtained reserve can be used to boost

the rocket engine, and/or to reduce the loading of the main turbine, which operates in aggressive oxidizing environment.

**Keywords:** *screw centrifugal pump, blade, optimization.*

## **Математическое моделирование зондирования верхних слоев атмосферы с помощью орбитальных тросовых систем**

В.А. Иванов<sup>1</sup>, С.А. Купреев<sup>1</sup>, В.С. Ручинский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>РУДН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский авиационный институт, Москва, Россия

E-mail: 2svr@mail.ru

Среди задач практического использования орбитальных тросовых систем (ТС) одно из первых мест обычно отводят задаче зондирования околоземного пространства с помощью аппаратуры, спускаемой на тросе до высот 100–150 км [1–5].

Известно, что на этих высотах спутник существует несколько часов, а зондирование с помощью метеорокетов оказывается еще менее продолжительным. Применение орбитальных тросовых систем позволяет практически на два порядка увеличить продолжительность зондирования верхних слоев с доставкой приборов в нижнюю термосферу и, возможно, в мезосферу.

Если зондирование атмосферы с использованием орбитальных тросовых систем осуществляется при снижении зонда с высоты 150 км до высоты 100 км, то продолжительность функционирования системы достигает 1040 ч. Такое время функционирования на указанных высотах спутника с корректирующей двигательной установкой потребовало бы энергетических затрат, определяемых величиной характеристической скорости порядка 4000 м/с. Таким образом, эффективность использования орбитальных тросовых систем для зондирования верхних слоев атмосферы оказывается достаточно высокой.

Приведенные соображения характеризуют возможные направления эффективного применения орбитальных тросовых систем для зондирования верхних слоев атмосферы и проведения на этих высотах геофизических исследований. Вместе с тем для построения конкретных схем зондирования необходимо иметь данные об особенностях движения орбитальных тросовых систем в процессе зондирования.

В настоящее время достаточно полно рассмотрены режимы движения орбитальных тросовых систем без учета действия аэродинамических сил.

При подготовке к проведению экспериментов по зондированию верхних слоев атмосферы с использованием орбитальных тросовых

систем необходимо подробное и обстоятельное изучение движения связки на высотах, где действием аэродинамических сил пренебречь нельзя.

В докладе представлены результаты моделирования режимов движения орбитальных тросовых систем, которые наиболее приемлемы для выполнения операции зондирования, с учетом действия аэродинамических сил.

**Ключевые слова:** космические тросовые системы, моделирование режимов движения, зондирование с учетом действия аэродинамических сил, верхние слои атмосферы.

### Литература

1. Белецкий В.В., Левин Е.М. Динамика космических тросовых систем. Москва: Наука, 1990. 336 с.
2. Иванов В.А. Зондирование атмосферы // *Авиация и космонавтика*. 1985. № 5. С. 45.
3. Иванов В.А., Купреев С.А., Ручинский В.С. Разработка и исследование математических моделей движения связанных космических объектов при испытании летательных аппаратов и спуске с орбиты на Землю. Хабаровск: ХГТУ, 2001. 72 с.
4. Математические модели и методы исследования динамики связанных космических объектов при решении практических задач / В.А. Иванов, С.А. Купреев, В.С. Ручинский, Е.В. Ручинская. Москва: ИЦ «МАТИ» — РГТУ им. К.Э. Циолковского, 2005. 185 с.
5. Иванов В.А., Купреев С.А., Ручинский В.С. Космические тросовые системы. Москва: Альфа-М, 2014. 208 с.

## Mathematical modeling sounding of the upper atmosphere with the help of orbital cable systems

V.A. Ivanov<sup>1</sup>, S.A. Kupreev<sup>1</sup>, V.S. Ruchinskiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>RUDN University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

E-mail: 2svr@mail.ru

Among the tasks of practical use of orbital cable systems (TC), one of the first places is usually assigned to the task of probing near-earth space with the help of equipment lowered on a cable to heights of 100–150 km [1–5].

It is known that at these altitudes the satellite exists for several hours, and the sounding with the help of meteor rockets is even less prolonged. The use of orbital cable systems allows almost two orders of magnitude to increase the duration of probing the upper layers with the delivery of instruments to the lower thermosphere and, possibly, to the mesosphere.

If the sounding of the atmosphere using orbital tether systems is performed by reducing the tip heights of 150 km to a height of 100 km, the duration of operation of the system reaches 1040 hours. This time of operation at these altitudes satellites with corrective propulsion system would

require energy expenditure, determined by the value of the characteristic velocity of 4000 m/s. Thus, the efficiency of orbital tether systems for sensing of the upper atmosphere is sufficiently high.

These considerations characterize the possible directions of effective application of orbital cable systems for probing the upper atmosphere and conducting geophysical research at these altitudes. At the same time, for the construction of specific sensing schemes, it is necessary to have data on the peculiarities of the motion of orbital cable systems in the sensing process.

At present, the modes of motion of orbital cable systems without taking into account the action of aerodynamic forces are considered quite fully.

In preparation for experiments on probing the upper atmosphere using orbital cable systems, a detailed and detailed study of the movement of the ligament at altitudes where the action of aerodynamic forces can not be neglected is necessary.

The report presents the results of modeling the modes of motion of orbital tether systems, which are most suitable for performing the sensing operation, taking into account the action of aerodynamic forces.

**Keywords:** *space cable systems, simulation of motion modes, sensing taking into account the action of aerodynamic forces, the upper layers of the atmosphere.*

## **Решение краевых задач теории упругости для анизотропных тел вращения с массовыми силами**

Д.А. Иванычев<sup>1</sup>, Е.Ю. Левина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ЛГТУ, Липецк, Россия

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: Lsivdml@mail.ru, hensil@yandex.ru

Целью работы является определение напряженно-деформированного состояния анизотропных тел вращения под действием массовых сил и внешних условий физического и кинематического характера в комбинированной постановке. Рассматриваются первая, вторая основные задачи механики, основная смешанная и контактная задачи для трансверсально-изотропного цилиндрического тела. Расчет напряженно-деформированного состояния от совокупности таких воздействий составляет актуальную научную задачу.

Поставленная задача обеспечивается развитием метода граничных состояний, опирающегося на понятия пространств внутреннего и граничного состояний. Построена теория формирования базисов пространств состояний, включающих в себя перемещения, деформации, напряжения и массовые силы. Базис внутренних состояний



содержит перемещения, деформации и напряжения; базис граничных состояний — перемещения точек границы, усилия на границе и массовые силы (последнее условно, так как массовые силы действуют на всю область тела).

Общий базис представляет собой соединение двух базисов. Первый базис формируется для случая плоской деформации от действия только массовых сил, основываясь на приеме применения фундаментальных многочленов. Далее на его основе, согласно методу интегральных наложений, индуцируется базис внутренних пространственных состояний. Второй базис представляет собой набор внутренних состояний в классической краевой задаче эластостатики для трансверсально-изотропных тел вращения. После ортогонализации общего базиса внутренних состояний, где в качестве скалярного произведения выступает внутренняя энергия упругого деформирования, искомое состояние определяется рядом Фурье, коэффициенты которого представляют собой определенные интегралы. В базисе граничных состояний скалярное произведение выражает работу поверхностных и массовых сил.

Особенность решения состоит в том, что искомое упругое поле удовлетворяет одновременно заданным условиям на границе тела и условиям внутри области (массовые силы), а не представляет собой сумму решений частных задач.

Приведены решения различных краевых задач для кругового в плане цилиндра из горной породы алевролита с соответствующими выводами.

## **Solution of boundary value problems of elasticity theory for anisotropic bodies of revolution with mass forces**

D.A. Ivanychev<sup>1</sup>, E.Yu. Levina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: Lsivdmal@mail.ru; hensil@yandex.ru

The aim of the work is to determine the stress-strain state of anisotropic bodies of revolution under the influence of mass forces and external conditions of a physical and kinematic nature in a combined formulation. The first and second basic problems of mechanics, the main mixed and contact problems for a transversely isotropic cylindrical body are considered. The calculation of the stress-strain state from the totality of such effects is an urgent scientific task.

The task is provided by the development of the method of boundary states, based on the concepts of spaces of internal and boundary states. A theory of the formation of bases of state spaces is constructed, which

includes displacements, deformations, stresses, and mass forces. The basis of internal states contains displacements, strains, and stresses; the basis of the boundary states is the displacement of the boundary points, the forces on the boundary, and mass forces (the latter is conditional, since mass forces act on the entire area of the body).

A common basis is a combination of two bases. The first basis is formed for the case of plane deformation from the action of only mass forces, based on the method of applying fundamental polynomials. Further, based on it, according to the method of integral overlays, a basis of internal spatial states is induced. The second basis is a set of internal states in the classical boundary-value problem of elastostatics for transversely isotropic bodies of revolution. After orthogonalization of the general basis of internal states, where the internal energy of elastic deformation acts as a scalar product, the desired state is determined by the Fourier series, the coefficients of which are certain integrals. In the basis of boundary states, the scalar product expresses the work of surface and mass forces.

The peculiarity of the solution lies in the fact that the desired elastic field satisfies simultaneously given conditions on the boundary of the body and conditions inside the region (mass forces), and does not represent the sum of the solutions of particular problems.

The solutions of various boundary value problems for a circular siltstone in a cylinder made of rock with the corresponding conclusions are given.

### **Сравнительный анализ некоторых методов корректирующего воздействия на орбиту сближающегося с Землей опасного астероида**

В.В. Ивашкин<sup>1,2</sup>, К.А. Стихно<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В настоящее время одним из самых опасных для Земли малых небесных тел является астероид Апофис, орбита которого такая, что в текущем столетии будет несколько близких сближений с Землей. При этом для некоторых сближений существует небольшая положительная вероятность столкновения с Землей. В работе на примере астероида Апофис исследуется задача предупреждения столкновения с Землей опасного астероида с помощью коррекции его орбиты. Исследуются характеристики импульсной коррекции, а также возможности ее реализации с помощью ударно-кинетического и ядерного воздействий. Сделано сравнение импульсных и слабых

воздействий. Отмечено, что слабые воздействия с медленным изменением орбиты астероида могут оказаться более удобными в силу потенциально большей точности коррекции. В работе анализируются характеристики гравитационного воздействия на астероид с помощью космического аппарата малой массы, удерживаемого управляющими реактивными двигателями в некоторой точке пространства вблизи астероида.

## **Comparison of some different types of dangerous near-Earth asteroid's orbit correction**

V.V. Ivashkin<sup>1,2</sup>, С.А. Stikhno<sup>2</sup>

<sup>1</sup> M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

In the paper for the asteroid Apophis that today is one of the most dangerous celestial bodies, some different types of dangerous asteroid orbit's correction are compared. Parameters of impulse correction are determined and possibilities for its kinetic and nuclear implementations are estimated. Impulse effects are compared with some weak effects. It is shown that the weak long term correction may be better from accuracy point of view than the short term impulse correction. Parameters of weak correction by a "gravitational tractor" are analyzed for a spacecraft with jet engines, which are capable to maintain the SC near-asteroid's position.

## **Две модели размыва земляных плотин**

А.В. Исаков, В.М. Овсянников

Московская государственная академия водного транспорта, Москва, Россия

E-mail: ovsyannikovvm@yandex.ru

Земляные дамбы и плотины гидросооружений имеют особенность переполняться с одной стороны водой и разрушаться с катастрофическими последствиями. Размыв земляных плотин ввиду больших их размеров происходит не мгновенно, а занимает некоторое, иногда продолжительное время. Поэтому полезно изучить различные стадии разрушения и различные механизмы, чтобы можно было грамотно предсказать изменение картины разрушения во времени и успеть предпринять правильные строительные меры для сохранения плотины или замедления ее разрушения для эвакуации населения.

Рассмотрен механизм волнового течения внутри непроточной щели, приводящий к ее расширению за счет уплотнения стенок и удлинения щели. Расчет проведен на базе неоднородного волнового уравнения, выведенного Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшицем [1], с учетом конвективных членов уравнения движения. В статье [2] выведена формула, учитывающая вклад в волнообразование. Показано, что с уменьшением угла щели интенсивность волнообразования в возвратном из щели течении сильно возрастает.

Второй рассмотренный механизм исследует волнообразование в фильтрационном течении, проходящем насквозь через всю толщину плотины. Генерируемые волны расширяют со временем ширину фильтрационного канала.

Проведены экспериментальные исследования прочности по штампу водонасыщенного грунта.

Материал должен быть дополнен механизмом взвешивания в щелевом потоке мельчайших частиц, скрепляющих крупные частицы, и вымыванием их из тела плотины при превышении скорости фильтрации критических значений. Частично это рассмотрено в монографии [3].

**Ключевые слова:** *фильтрация, генерация волн, дамба, разрушение.*

### **Литература**

1. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. Москва: Наука, 1986.
2. *Овсянников В.М.* Вибратор Ландау — Лифшица // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. Вып. 4. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-4-1739
3. *Кондратьев А.С., Овсянников В.М.* и др. Транспортирование водоугольных суспензий. Гидродинамика и температурный режим. Москва: Недра, 1988. 210 с.

## **Two models of erosion of dams from the soil**

A.V. Isakov, V.M. Ovsyannikov

Moscow State Academy of Water Transport, Moscow, Russia  
E-mail: ovsyannikovvm@yandex.ru

The dams of hydraulic structures can overflow on one side and collapse. Such destruction is a disaster. The destruction of a large dam has a great time.

We must study the various stages of destruction and various mechanisms to predict the change in the pattern of destruction over time. In this case, we can take the right construction measures to preserve the dam. We can get time to evacuate people.

We analyze the wave flow mechanism inside the gap in the dam. This mechanism leads to an increase in the size of the gap. The calculation is based on the inhomogeneous wave equation derived by Landau and Lifshitz [1]. They used convective terms of the equation of motion.

We used the formula from the article [2].

A decrease in the slit angle leads to an increase in the intensity of wave formation in the return flow.

The second mechanism investigates wave formation in the filtration flow through the dam. Waves expand the width of the filtration channels. We conducted experimental studies of the strength of the stamp for water-saturated soil.

We did not take into account the movement of small particles of soil, which strengthen large particles. This is partially considered in the monograph [3].

**Keywords:** *filtration, wave generation, dam, destruction.*

### References

1. Landau L.D., Lifshits E.M. *Hydrodynamics*, Moscow, Nauka Publ., 1986.
2. Ovsyannikov V.M. Landau — Lifshits vibrator in the equations of gas dynamics. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 4.  
DOI: 10.18698/2308-6033-2018-4-1739
3. Kondratiev A.S., Ovsyannikov V.M. et al. *Transportation of water-coal suspensions. Hydrodynamics and temperature conditions*. Moscow, Nedra Publ., 1988, 210 p.

## Задачи контактного взаимодействия для цилиндрических тел с неоднородными покрытиями

К.Е. Казаков

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия  
E-mail: kazakov-ke@yandex.ru

Элементы машины и механизмов состоят из множества узлов и деталей, взаимодействия которых приводят к появлению внутреннего и контактного напряжения, а также износу и даже разрушению. Расчеты износостойкости взаимодействия тел позволяют инженерам предсказать взаимное поведение тел в процессе их совместной работы, анализировать распределения напряжений и деформаций в таких телах и принимать необходимые меры по изменению конструкции или условий ее работы на этапе проектирования.

В данной работе описывается осесимметричная контактная задача о взаимодействии жесткой втулки и вязкоупругой стареющей трубы, покрытой неоднородным упругим слоем. Для указанной задачи построена ее математическая модель, представляющая из себя смешанное интегральное уравнение. Получено аналитическое решение задачи о нахождении контактных давлений под втулкой, позволяющее производить эффективные расчеты даже в случае, когда неодно-

родность покрытия описывается быстроизменяющейся или разрывной функциями.

**Ключевые слова:** *контактная задача, неоднородное покрытие, смешанное интегральное уравнение, аналитические методы.*

## **Problems of contact interaction for cylindrical bodies with nonuniform coatings**

K.E. Kazakov

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics  
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
E-mail: kazakov-ke@yandex.ru

Machine and mechanism elements consist of many nodes and parts. Their interactions lead to the appearance of internal and contact stresses, as well as wear and even destruction. Calculations of the wear-contact interaction for bodies allow engineers to predict the mutual behavior of bodies in the process of their joint work, to analyze the distribution of stresses and strains in such bodies, and to take the necessary measures to change the design or its working conditions at the design stage.

In this paper, the axisymmetric contact problem of interaction between rigid bush and viscoelastic aging pipe with nonuniform elastic coating is described. For this problem, its mathematical model is constructed. It is mixed integral equation. An analytical solution for the problem of finding contact stresses under the bush is obtained. It allow one to make efficient calculations even when the coating nonuniformity described by rapidly changing or discontinuous functions.

**Keywords:** *contact problem, nonuniform coating, mixed integral equation, analytical methods.*

## **Особенности интенсивных колебаний баротропной жидкости**

В.А. Калиниченко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: kalin@ipmnet.ru

Целью представленной работы является экспериментальное исследование регуляризации разрушающихся стоячих гравитационных волн на свободной поверхности воды или слоем более легкой несмешивающейся с водой вязкой жидкости, или слоем плавающих сферических частиц положительной плавучести. Рассматриваются колеба-

ния двухслойной системы в баротропном режиме. Для возбуждения волн в прямоугольном сосуде используется параметрический резонанс. Рассмотрен эффект увеличения толщины верхнего слоя на предельную крутизну регулярной волны и ее диссипативные характеристики. Показано, что использование или растительного масла, или полистироловых сферических частиц в качестве верхнего слоя существенно меняет динамику волновой моды — наблюдается волновая регуляризация с полным подавлением механизмов разрушения. Проведено сравнение со случаем стоячих гравитационных волн на свободной поверхности однородных жидкостей, вязкость которых существенно отличается: воды и растительного масла. Работа является продолжением цикла исследований автора, в которых изучался механизм разрушения гравитационных поверхностных волн и вязкая регуляризация интенсивных волновых движений однородной жидкости. Тематика доклада связана с решением практических задач по подавлению интенсивных колебаний жидкости со свободной поверхностью в виде стоячих волн.

*Работа выполнена по теме государственного задания № АААА-А17-117021310375-7.*

**Ключевые слова:** *регулярные, нерегулярные и разрушающиеся поверхностные волны Фарадея, двухслойная жидкость, баротропные волны, вязкость жидкости, диссипативные эффекты, декремент.*

## Features of intense oscillations of a barotropic fluid

V.A. Kalinichenko <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Ishlinskii Institute for Problems in Mechanics  
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: kalin@ipmnet.ru

The aim of the present study is to investigate experimentally regularization of breaking standing gravity waves on the free water surface by means of either a layer of lighter viscous liquid immiscible with water or a layer of floating particles of positive buoyancy. The oscillations of a two-layer system in a barotropic mode are considered. Parametric resonance is used to excite the waves in a rectangular vessel. The effect of increase in the upper layer thickness on the limit steepness of the regular wave and its dissipative properties is considered. It is shown that the use of either seed oil or floating polystyrene balls as the upper layer changes significantly wave mode dynamics, namely, regularization of waves with complete suppression of breaking mechanisms. The situation considered is compared with the case of standing gravity wave on the free surface of homogeneous fluids whose viscosity differs significantly, namely, water and seed oil. The report is a continuation of the cycle of author's investi-

gations in which the mechanism of breaking the gravity surface waves and viscous regularization of the intense wave motions of homogeneous fluid were studied. The subject of the study is connected with solution of practical problems on suppression of intense oscillations of a fluid with free surface in the form of standing waves.

*The work was supported by the State Program no. AAAA-A17-117021310375-7.*

**Keywords:** *regular, irregular, and breaking Faraday surface waves, two-layer fluid, barotropic waves, fluid viscosity, dissipation effects, emulsion.*

### **Анализ влияния процесса отделения лобового теплозащитного экрана от возвращаемого аппарата на их аэродинамические характеристики**

В.Т. Калугин, Д.М. Слободянюк

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: kaluginvt@mail.ru, slob.dima@mail.ru

При движении возвращаемого аппарата (ВА) в атмосфере Земли происходит отделение лобового теплозащитного экрана (ЛТЭ). После отделения, когда ЛТЭ находится в непосредственной близости от ВА, имеет место взаимная аэродинамическая интерференция, существенно влияющая на безопасность отделения. Вследствие данного эффекта происходит изменение суммарных аэродинамических характеристик (АДХ) как ВА, так и ЛТЭ, что может привести к возникновению колебаний и столкновению. Ранее проводилось численное моделирование обтекания ВА и находящегося вблизи него ЛТЭ [1], однако в работе не было учтено влияние движения ЛТЭ на АДХ при отделении.

В настоящей работе рассматривается задача совместного обтекания ЛТЭ и ВА с применением неподвижной и динамической сеток в пространственно-нестационарной постановке. Выявляются особенности течения, оценивается влияние движения ЛТЭ в набегающем потоке на АДХ ВА и ЛТЭ. Проводится сравнение АДХ при расчете с применением различных разновидностей сеток. Отмечено, что учет относительной скорости ЛТЭ играет существенную роль как на изменение АДХ, так и на трансформацию структур течения в отличие от расчетов при неподвижном экране. Влияние скорости движения отделяемых элементов может быть учтено при проведении расчетов с использованием динамической сетки, в результате которых получаются приемлемые результаты для инженерной практики.

**Ключевые слова:** *аэродинамические характеристики, лобовой теплозащитный экран, возвращаемый аппарат, динамическая сетка, 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.

### **Analysis of the frontal heat shield separation process from the reentry vehicle on their aerodynamics characteristics using numerical simulation**

V.T. Kalugin, D.M. Slobodyanyuk

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: kaluginvt@mail.ru, slob.dima@mail.ru

During reentry vehicle (RV) moving in the Earth's atmosphere, the frontal heat shield (FHS) is separated. After separation, when FHS moves in close proximity to the RV, there is mutual aerodynamic interference, which significantly affects the separation safety. As a result of this effect, the total aerodynamic characteristics (ADC) of both RV and FHS occur that can lead to oscillations and collision. Earlier, numerical modeling of the flow around the RV and the nearby FHS was carried out [1], however, the influence of the motion of the FHS on the ADC during separation was not taken into account in the work.

In the present paper, we consider the problem of the joint flow around an FHS and RV using fixed and dynamic grids in a spatially unsteady setting. Features of the flow are revealed, the influence of the FHS motion in the incident flow on the ADC of the RV and FHS is estimated. Comparison of ADH is carried out in the calculation using various varieties of grids. It is noted that taking into account the relative FHS velocity plays a significant role both in the change in the ADC and in the transformation of the flow structures, in contrast to calculations with a fixed screen. The influence of the speed of movement of the separated elements can be taken into account when performing calculations using a dynamic grid, as a result of which acceptable results for engineering practice are obtained.

**Keywords:** *aerodynamic characteristics, frontal heat shield, return apparatus, dynamic mesh, FlowVision.*

## References

1. Aksenov A.A. et al. Computer simulation of the flow and relative motion of the returned vehicle and the hatch of the parachute container during separation at the descent site. *Space Engineering and Technologies*, 2015, no. 2, pp. 39–50.

## Применение вычислительного комплекса OpenFOAM для решения задач аэродинамики

В.Т. Калугин<sup>1</sup>, А.С. Епихин<sup>1,2</sup>, Д.К. Назарова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup>ИСП им. В.П. Иванникова РАН, Москва, Россия

E-mail: kaluginvt@bmstu.ru, andy\_e@bk.ru, dknazarova@bmstu.ru

Численное моделирование процессов обтекания летательных аппаратов самых различных форм позволяет существенно дополнить экспериментальные данные и расширить диапазоны исследуемых параметров. Широкое распространение сейчас получили открытые пакеты численного моделирования. Решение каждой конкретной задачи имеет свои особенности, что требует подбора способа и параметров моделирования.

В работе изложены особенности и подходы численного моделирования прикладных задач аэродинамики с применением программного комплекса с открытым исходным кодом OpenFOAM. Рассмотрено обтекание летательных аппаратов и их элементов различных форм:

- отделяемых от ракет-носителей обтекателей в сверх- ( $2 > M_\infty > 4$ ), транс- ( $0,8 > M_\infty > 1,2$ ) и дозвуковом ( $M_\infty = 0,1$ ) потоке воздуха;
- модели маневренного самолета с тормозным щитком в дозвуковом потоке;
- спускаемого аппарата сегментно-сферической формы при  $0,6 > M_\infty > 4$ ;
- истечения сверхзвуковых струй в затопленное пространство.

Использовались как подходы, входящие в состав комплекса OpenFOAM, так и собственные разработки авторов. Моделирование дозвукового обтекания аппаратов проводилось с применением решателей `rhoFoam`, `simpleFoam`, для моделирования обтекания транс- и сверхзвуковым потоком применялись решатели `RhoCentralFoam` и `dbnsTurbFoam`, использовались модели турбулентности  $k-\omega$  SST и Смагоринского. Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными.

С помощью численного моделирования выявлено, что особенностью обтекания отделяемых от ракет-носителей элементов в форме тонких оболочек (обтекателей) является наличие полости, внутри которой образуется застойная зона, аэродинамические характеристики таких тел существенно отличаются от аэродинамических характеристик соответствующих сплошных тел. Тормозной щиток на маневренном самолете генерирует вихри, которые могут воздействовать на управляющие поверхности, расположенные в спутном следе, что вызывает их тряску; разработана методика, которая позволяет с доста-

точной точностью моделировать такие явления. Также показано, что открытый пакет OpenFOAM может быть применен для моделирования истечения сильно недорасширенных струй при функционировании изделий ракетно-космической техники.

Таким образом, проведенные исследования позволили сформулировать методики расчета аэродинамических характеристик и структур течения для решения широкого круга задач в авиационной и ракетно-космической промышленности.

**Ключевые слова:** расчет аэродинамических характеристик, обтекатель летательного аппарата, численное моделирование процесса.

## **Application of OpenFOAM computational package for solving aerodynamics problems**

V.T. Kalugin<sup>1</sup>, A.S. Epikhin<sup>1,2</sup>, D.K. Nazarova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Ivannikov Institute for System Programming of the RAS, Moscow, Russia  
E-mail: kaluginvt@bmstu.ru, andy\_e@bk.ru, dknazarova@bmstu.ru

Numerical modeling of flow around the aircrafts, that can have various forms, allows us to supplement the experimental data and extend the range of the studied parameters. Open source packages for numerical modeling are widely practiced now. The solution of each specific problem has its own unique features and we need to choose the method and parameters of modeling.

In this investigation some numerical solutions and peculiarities of applied aerodynamic problems in open source program complex OpenFOAM are represented. The flow around various aircrafts and elements of this aircrafts is studied. We analyzed:

- fairings, that separate from the launch vehicles, in supersonic ( $2 > M_\infty > 4$ ), transsonic ( $0.8 > M_\infty > 1.2$ ) and subsonic ( $M_\infty = 0.1$ ) flow,
- the model of a maneuverable aircraft with an airbrake in subsonic flow,
- segment-spherical reentry vehicle in flow with Mach number from 0.6 to 4,
- supersonic jet discharge into space.

Both basic OpenFOAM approaches and our own developments were used. OpenFOAM solvers PISOFoam and SimpleFoam were applied for subsonic flow modeling, RhoCentralFoam and dbnsTurbFoam solvers were used for transonic and supersonic flow modeling. We chose  $k-\omega$  SST and Smagorinsky turbulence models. Calculation results were compared with experimental data.

Using numerical modeling it was found that a peculiarity of the flow around separable from the launch vehicle elements which are like thin shells (fairings) is the presence of a cavity which has a stagnant zone inside, aerodynamic characteristics of such bodies differ from aerodynamic characteristics of corresponding solid bodies. The airbrake on a maneuverable aircraft generates vortices, that effect on control surfaces in vortex wake, which cause buffeting; developed modeling methodology allows us to simulate such flow effects with sufficient accuracy. It is also shown that the open source package OpenFOAM can be used to simulate highly under-expanded jets discharge during the operation of the space vehicle.

So, conducted studies allowed us to formulate methodologies for aerodynamic characteristics and flow structures calculating, which are needed for solving a wide range of problems in aviation and space industry.

**Keywords:** *calculation of aerodynamic characteristics, aircraft fairing, numerical simulation of the process.*

## **Матрица Якоби и сингулярные конфигурации манипулятора в расчетно-графической работе по кинематике**

О.М. Капустина, А.И. Кобрин

НИУ «МЭИ», Москва, Россия  
E-mail: KapustinaOM@mpei.ru, KobrinAI@mpei.ru

Авторам заданий расчетно-графической работы по кинематике управляемого движения манипулятора приходится исключать сингулярные конфигурации механизмов путем корректирования начальных условий движения. Некорректные начальные условия могут быть введены при использовании систем символьных вычислений как преподавателем, так и в результате ошибок студента. При этом механизм в процессе рассчитываемого движения может оказаться в сингулярной конфигурации, что проявляется, в частности, в неограниченном росте угловых скоростей его звеньев. Потребность объяснения этого явления студенческой аудитории приводит к необходимости введения в разделе «Кинематика» современного курса теоретической механики таких понятий, как матрица Якоби манипулятора, сингулярная конфигурация механизма и других. В докладе представлены примеры построения и анализа матрицы Якоби в процессе нахождения таких конфигураций.

**Ключевые слова:** *кинематика, управляемый манипулятор, матрица Якоби, сингулярная конфигурация механизма.*

## Jacobi matrix and singular configurations of manipulator in calculation and graphic work on kinematics

O.M. Kapustina, A.I. Kobrin

NRU «MPEI», Moscow, Russia  
E-mail: KapustinaOM@mpei.ru; KobrinAI@mpei.ru

The authors of the tasks of the calculation and graphic work on the kinematics of the controlled motion of the manipulator have to exclude singular configurations of mechanisms by adjusting the initial conditions of motion. Incorrect initial conditions can be introduced when using symbolic computing systems both by the teacher and as a result of student errors. Moreover, the mechanism in the process of the calculated motion may appear in a singular configuration, which is manifested, in particular, in an unlimited increase in the angular velocities of its links. The necessity to explain this phenomenon to the student audience leads to the need to introduce in the section “Kinematics” of the modern course of theoretical mechanics such concepts as the Jacobi matrix of the manipulator, the singular configuration of the mechanism, and others. The report presents examples of the construction and analysis of the Jacobi matrix in the process of finding such configurations.

**Keywords:** *kinematics, controlled manipulator, Jacobi matrix, singular configuration of the mechanism.*

## Собственные колебания отрезных фрез

А.Ю. Карпачев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: karpachevay@bmstu.ru

Проектирование и конструирование изделий, подвергающихся при эксплуатации переменным силовым воздействиям, должно проводиться на основе расчетов динамических свойств создаваемых конструкций. В наибольшей степени это относится к конструкциям, содержащим тонкостенные элементы. В связи этим разработка достоверного метода определения собственных динамических характеристик режущих инструментов в виде отрезных кругов и фрез представляется актуальной.

Рассмотрен инженерный метод расчета частот и форм собственных колебаний дисковых отрезных фрез переменной толщины в радиальном направлении. Проведено сравнение результатов расчета предлагаемым методом с данными, полученными методом МКЭ,

а также с результатами экспериментов, проведенных с использованием уникального современного оборудования.

Таким образом, была установлена правомерность применения предложенного подхода к анализу динамических свойств рассмотренного вида дисковых режущих инструментов. Полученные результаты могут служить основанием при оценке критических режимов эксплуатации исследуемых фрез, а сочетание последовательного применения предложенных методов позволяет осуществлять проектирование этих инструментов с заданными динамическими характеристиками.

**Ключевые слова:** *отрезная фреза, свободные колебания, динамические характеристики.*

## **Self-oscillations of the cutting cutters**

A.Yu. Karpachev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: karpachevay@bmstu.ru

The design and construction of products subjected to variable forces during operation should be carried out on the basis of calculations of the dynamic properties of the created structures. To the greatest extent this applies to structures containing thin-walled elements. In this regard, the development of a reliable method for determining the intrinsic dynamic characteristics of cutting tools in the form of cutting wheels and cutters is relevant.

The engineering method of calculation of frequencies and forms of natural oscillations of disk cutting mills of variable thickness in the radial direction is considered. The results of the calculation by the proposed method are compared with the data obtained by the FEM method, as well as the results of experiments carried out using unique modern equipment.

Thus, the validity of the proposed approach to the analysis of the dynamic properties of the considered type of disc cutting tools was established. The obtained results can serve as a basis for assessing the critical operating conditions of the studied cutters, and the combination of consistent application of the proposed methods allows the design of these tools with specified dynamic characteristics.

**Keywords:** *cutting mill, free oscillations, dynamic characteristics.*

## Решение обратной задачи динамики с учетом нелинейной функции стабилизации связей

И.Е. Каспирович

РУДН, Москва, Россия  
E-mail: kaspирович.ivan@mail.ru

При решении задачи устойчивости численного решения относительно уравнений связей при численном интегрировании применяется метод стабилизации, предложенный Баумгарте. Согласно этому методу производные по связям приравниваются к линейной форме по связям. Управление значениями коэффициентов линейной формы позволяет добиться устойчивости при численном интегрировании. В работе рассматривается возможность построения уравнений Лагранжа второго рода с учетом произвольной однородной нелинейной функции стабилизации. Главным выводом исследования можно считать то, что необходимо ввести диссипативную функцию для полноценного решения задачи стабилизации.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-00261).*

**Ключевые слова:** стабилизация связей, диссипативная функция, условия Гельмгольца.

## Solution of inverse dynamical problems with regard for nonlinear constraint stabilization

I.E. Kaspirovich

RUDN University, Russia  
E-mail: kaspирович.ivan@mail.ru

Baumgarte's method of constraint stabilization can be applied to find a stable numerical solution in relation for constraint equations during the numerical integration. According to this method full time derivatives of constraints are equated to their arbitrary linear form. Choosing values of the coefficients of this form allow us to obtain a stable solution. In this paper a method of constructing Lagrange equations of the second kind is considered with regard for a nonlinear homogeneous stabilization function. A necessity if introducing dissipative function to find a complete stabilization problem's solution can be the main conclusion of the research.

*This work is supported by RFBR (project No. 19-08-00261).*

**Keywords:** constraint stabilization, dissipative function, Helmholtz conditions.

## **Управление движением ракеты методом стабилизации связей**

К.З. Каспирович

РУДН, Москва, Россия  
E-mail: kamilaska24@gmail.com

В работе рассматриваются методы решения вариационной задачи реализации управления, стабилизирующего оптимальное движение ракеты в гравитационных полях, нахождения наиболее точных ее траекторий, а также применение полученных результатов для решения различных практических задач динамики полета. Актуальность исследования данных проблем связана с тем, что космическое наведение и прослеживание траектории объекта в процессе всего полета является важнейшей основой успешного космического маневра кораблей, спутников, ракет. Построение и осуществление на практике законов автономного наведения в применении к современным видам двигательной техники является острой нерешенной на сегодняшний день задачей, которая зависит от возможности двигателей летательных аппаратов производить необходимую для полета тягу. Учитывается тот факт, что в реальности объект летит не по заданной траектории, а имеет определенное отклонение из-за неточностей параметров модели полета и двигательной системы. Поэтому возникает необходимость постановки задачи стабилизации для нахождения условий оптимального управления. Задачи стабилизации и управления движением являются важными как с теоретической точки зрения, так и в силу многочисленных технических приложений. С теоретической точки зрения данные задачи важны прежде всего тем, что они относятся к сложным задачам механики и всякий раз требуют для своего решения новые подходы и методы. При этом характер задачи стабилизации движений существенно зависит от дополнительных условий, которые накладываются на динамическую систему.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-00261).*

## **Control of the rocket movement by means of stabilization of communications**

K.Z. Kaspirovich

RUDN University, Moscow, Russia  
E-mail: kamilaska24@gmail.com

The paper deals with the methods of solving the variational problem of control implementation, stabilizing the optimal motion of the rocket in gravitational fields, finding the most accurate trajectories, as well as the application of the results to solve various practical problems of flight



dynamics. The relevance of the study of these problems is due to the fact that space guidance and tracking the trajectory of the object during the entire flight is the most important basis for successful space maneuver of ships, satellites, missiles. The construction and implementation in practice of the laws of Autonomous guidance in application to modern types of propulsion technology is an acute unsolved problem today, which depends on the ability of aircraft engines to produce the necessary thrust for flight. It takes into account the fact that in reality the object does not fly on a given trajectory, but has a certain deviation due to inaccuracies in the parameters of the flight model and the propulsion system. Therefore there is a need for the formulation of the stabilization problem to find conditions of optimal control. The problems of stabilization and motion control are important both from a theoretical point of view and because of numerous technical applications. From a theoretical point of view, these problems are important primarily because they relate to complex problems of mechanics, and each time require new approaches and methods for their solution. In this case, the nature of the problem of stabilization of movements significantly depends on the additional conditions that are imposed on the dynamic system.

*This work is supported by RFBR (project No. 19-08-00261).*

### **Возможность увеличения механической мощности ветротурбины, работающей на основе эффекта Магнуса, путем добавления степеней свободы системы**

Л.А. Климина<sup>1</sup>, М.В. Ишханян<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИИ механики МГУ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (РУТ (МИИТ)), Москва, Россия  
E-mail: klimina@imec.msu.ru

Рассмотрена модель малогабаритной ветротурбины, работающей на основе эффекта Магнуса. В классическом случае каждая «лопасть» такой турбины представляет собой ротор Савониуса, который может вращаться вокруг собственной оси симметрии. Предлагается новая конструкция турбины, в которой каждая «лопасть» представлена двумя роторами Савониуса. Проведено сравнение двух случаев, отличающихся числом степеней свободы системы. В первом случае оба ротора, образующие «лопасть», представляют собой одно твердое тело. Во втором случае вращение каждого ротора относительно его оси симметрии описывается независимой обобщенной координатой. Приведена оценка мощности, отбираемой турбиной у потока в каждом из этих случаев.

**Ключевые слова:** ветроэнергетическая установка, эффект Магнуса, механическая мощность.

## **Increasing of the trapped power of Magnus-type wind turbine by adjunction of additional degrees of freedom upon**

L.A. Klimina<sup>1</sup>, M.V. Ishkhanyan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Mechanics of Lomonosov MSU, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Federal State Institution of Higher Education "Russian University of Transport",  
Moscow, Russia

E-mail: klimina@imec.msu.ru

The mathematical model of a small-scale Magnus-type wind turbine is studied. In a common case, each blade of such turbine is represented by a Savonius rotor that can rotate around its axis of symmetry. The new construction of the turbine is suggested: each blade is represented by two Savonius rotors. These rotors can either have independent or common bearings. These two cases (which differ from each other in number of degrees of freedom of the system) are compared with respect to the value of trapped power.

**Keywords:** *wind turbine, Magnus effect, trapped power.*

## **Новый метод опреснения воды на основе магнитогидродинамического эффекта**

В.Д. Козырев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: kozyrevvd@rambler.ru

Общеизвестно, что около 70 % поверхности Земного шара занимает вода. Поэтому создается иллюзия, что вода для питья, техники и хозяйства никогда не закончится. Но это не так! Современный мир уже столкнулся с серьезной проблемой нехватки пресной воды, так как только она может быть использована в хозяйственной деятельности человека. Действительно, пресной воды на Земле всего 3 % от количества всей воды на планете. И 2 % находится в замороженном виде в ледниках, что делает ее малодоступной и крайне дорогой в добыче. Получается, что в распоряжении человека остается только 1 %.

Во многих странах эпидемии вызваны именно плохим качеством воды. И даже такой воды в некоторых из них начинает не хватать. За последние 10 лет дефицит пресной воды в мире только усугубился, и эта тенденция не претерпит каких-либо изменений в ближайшем будущем. Поэтому проблема нехватки пресной воды требует безотлагательного решения. Так как ледники малодоступны и их запасы не столь велики, проще всего будет опреснять соленую воду.

В данной статье будет предложен и рассмотрен новый метод опреснения воды на основе магнетогидродинамического эффекта. За основу будет взят эффект Холла. Также будет представлена полезная модель данной установки, приведены физические расчеты. Будет оценена эффективность данной установки и ее производительность.

**Ключевые слова:** опреснение соленой воды, эффект Холла, магнетогидродинамический эффект, нехватка пресной воды, глобальная проблема, решение глобальной проблемы, электромагнетизм, физика в жизни.

## **New method of water desalination based on magneto hydrodynamic effect**

V.D. Kozyrev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: kozyrevvd@rambler.ru

It is well known that about 70 % of the earth's surface is water. Therefore, the illusion is created that the water for drinking, technology and economy will never end. However, it is not! The modern world is already faced with a serious problem of shortage of fresh water, as only it can be used in human economic activity. Indeed, fresh water on Earth is only 3 % of the amount of all water on the planet. And 2% is frozen in glaciers, making it inaccessible and extremely expensive to mine. It turns out that only 1% remains at the disposal of a person.

In many countries, epidemics are caused by poor water quality. In addition, even such water in some of them is beginning to lack. Over the past 10 years, the shortage of fresh water in the world has only worsened, and this trend will not change in the near future. Therefore, the problem of lack of fresh water requires an urgent solution. Since glaciers are inaccessible and their reserves are not so large, it will be easiest to desalinate salt water.

In this article, a new method of desalination based on magneto hydrodynamic effect will be proposed and considered. The Hall Effect will be used to solve this problem. A useful model of this installation will also be presented, physical calculations are given. The efficiency of this unit and its performance will be evaluated.

**Keywords:** salt-water desalination, Hall Effect, magneto hydrodynamic effect, fresh water shortage, global problem, global problem solving, electromagnetism, physics in life.

## **Аналитический расчет и применение кинематических характеристик автомобильного транспортного средства при косом наезде на боковые тросовые ограждения**

Г.П. Колесникова

Военная академия Ракетных войск стратегического назначения  
имени Петра Великого, Балашиха, Россия  
E-mail: kolesnikovagp@mail.ru

В докладе приведены обоснования рассмотрения автомобильного транспортного средства (АТС) как материальной точки при косом наезде на боковые тросовые ограждения, проведен сравнительный анализ получаемых траекторий с конечно-элементной (КЭ) моделью на примере АТС типа автобус «Мерседес-Бенц-0345». Также проведен анализ кинематических результатов виртуального испытания в сравнении с аналитическими кинематическими расчетами. Анализируется, насколько необходимо учитывать ударное воздействия при контакте АТС со стойками тросового ограждения и насколько учет ударного воздействия влияет на результаты аналитического расчета.

Аналитический расчет кинематических характеристик АТС позволяет провести как проверку корректности разрабатываемой КЭ-модели тросовых ограждений, так и могут быть использованы при исследовании движения автомобильного транспортного средства непосредственно при построении КЭ-модели.

В докладе также представлен метод оценки поперечного сечения тросового ограждения по данным приближенного аналитического моделирования траектории АТС при косом наезде на боковые тросовые ограждения; осуществлен подбор допустимых диаметров тросов для удержания АТС типа ГАЗ-3102 и автобус «Мерседес-Бенц-0345».

Результаты аналитического расчета были подтверждены в работах [1, 2] данными математического моделирования наезда по данным натурных испытаний. КЭ-моделирование проводилось с помощью многоцелевого конечно-элементного комплекса LS-DYNA.

**Ключевые слова:** тросовое ограждение, аналитическое моделирование, траектория движения.

### **Литература**

1. Колесникова Г.П., Гасайниев А.Р. Приближенное математическое моделирование траектории движения АТС при косом наезде на боковые тросовые ограждения // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. Электронный научный журнал. 2018. № 1 (15) март. URL: <http://www.adi-madi.ru>
2. Колесникова Г.П. Приближенные методы аналитического моделирования траектории движения АТС при косом наезде на боковые тросовые ограждения // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. Электронный научный журнал. 2018. № 2 (16) март. URL: <http://www.adi-madi.ru>

## **Analytic calculations and the use of the vehicle kinematic characteristics when a cable barrier side hitting occurs**

G.P. Kolesnikova

Peter the Great Strategic Missile Troops Academy, Balashikha, Russia  
E-mail: kolesnikovagp@mail.ru

The report provides the rationale for considering a motor vehicle as a material point in oblique collision with side cable barriers. A comparative analysis of the resulting trajectories using the finite element (FE) model on a Mercedes-Benz-0345 bus has been carried out. An analysis of the kinematic results of a virtual test has been also carried out in comparison with analytical kinematic calculations.

In the report it has been made an analysis of how much impact should be taken into account when the automobile vehicle exchange is in contact with racks of cable barriers, and how much impact accounting affects the results of an analytical calculation.

An analytical calculation of the kinematic characteristics of the automobile vehicle has exchanged allows one to carry out a verification of the correctness of the developed FE-model of cable barriers, and can be used to study the movement of an automobile vehicle directly when constructing a FE-model.

Also in the report it has presented a method for estimating the cross-section of cable barriers according to approximate analytical modeling of the automobile vehicle trajectory during oblique collision with side cable barriers; allowed selection of cable diameters for holding the automobile vehicle exchanges of the GAZ-3102 type and the Mercedes-Benz-0345 Bus has been carried out.

The results of the analytical calculation has been confirmed in the works [1, 2] by the data of mathematical modeling of collisions according to field tests. FE modeling has been performed using the LS-DYNA multipurpose finite element complex.

**Keywords:** *cable barrier, mathematical modeling, trajectory.*

## Проникновение уплотнения в ускоренно движущийся слой сжимаемого газа

Г.Ю. Котова<sup>1</sup>, К.В. Краснобаев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>ИКИ РАН, Москва, Россия

E-mail: kvk-kras@list.ru, gviana.k@gmail.com

Классические результаты по взаимодействию капель с поверхностью жидкости получены в приближении несжимаемости. В то же время эффекты сжимаемости, особенно для газовых сред, отражены в литературе менее полно. Поэтому в работе исследуется влияние сжимаемости среды на образование кумулятивных струй и «хвостов» при погружении газового облака (сгустка, уплотнения) в неоднородный слой газа. Рассматриваются двумерные адиабатические движения совершенного газа. Предполагается, что вещество слоя находится в гравитационном равновесии. Проведено математическое моделирование взаимодействия облака и слоя. Показано, что при сверхзвуковых относительных скоростях слоя и сгустка движение сопровождается возникновением ударной волны. Интенсивность ударной волны зависит не только от геометрических факторов, но и от увеличения плотности и температуры слоя перед фронтом. Плотность перед сгустком возрастает по мере его продвижения в глубь слоя. Соответственно возрастает число Струхала и обтекание является нестационарным.

Впервые выполнены расчеты взаимодействия облака со слоем конечной толщины. Установлено, что структура движения определяется величиной ускорения, а также характерными временами деформации сгустка и его прохождения через слой. Если влиянием ускорения можно пренебречь, то преобладают затекание газа вслед за уплотнением и образование «хвостов». С учетом ускорения при достаточно большой толщине слоя возникает кумулятивная струя. В том случае, когда вызываемые движением облака возмущения нарастают вследствие неустойчивости Рэля — Тейлора, возможно образование как кумулятивных струй, так и «хвостов».

Результаты исследования позволили оценить условия, благоприятствующие наблюдениям кумулятивных струй в областях активного звездообразования.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-01-00184).*

## Penetration of cloud in the accelerating moving layer of compressible gas

G.Yu. Kotova<sup>1</sup>, K.V. Krasnobaev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI), Moscow, Russia  
E-mail: kvk-kras@list.ru, gviana.k@gmail.com

Classical results on the interaction of droplets with a liquid surface were obtained in the incompressibility approximation. At the same time, compressibility effects, especially for gaseous media, are less often reflected in the literature. Therefore, the effect of the compressibility of the medium on the formation of cumulative jets and tails upon immersion of a gas cloud (clot, condensation) in an inhomogeneous gas layer is investigated. Two-dimensional adiabatic motions of a perfect gas are considered. It is assumed that the medium of the layer is in gravitational equilibrium. Mathematical modeling of the interaction of the cloud and the layer is carried out. It is shown that the motion is accompanied by the appearance of a shock wave at supersonic relative velocities of the layer and clot. The intensity of the shock wave depends not only on geometric factors, but also on an increase in the layer density and temperature ahead of the front. The density before the clot increases as it moves deeper into the layer. Accordingly, the Strouhal number increases and the flow around is unsteady.

For the first time, calculations of a cloud interaction with a layer of finite thickness were performed. It is established that the motion structure is determined by the acceleration magnitude, as well as the characteristic times of deformation of the clot and its advance through the layer. If the influence of acceleration can be neglected, then gas leakage in the wake of condensation and the formation of tails prevail. Taking into account acceleration with a sufficiently large layer thickness, a cumulative jet arises. In the case when perturbations caused by the motion of the cloud increase due to Rayleigh — Taylor instability, the formation of both cumulative jets and tails is possible.

The results of the study made it possible to evaluate the conditions favorable for the observation of cumulative jets in the regions of active star formation.

*This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 18-01-00184).*

## **О двух методах исследования устойчивости стационарных движений систем с геометрическими связями**

А.Я. Красинский

Московский авиационный институт, Москва, Россия

E-mail: krasinsk@mail.ru

Устойчивость установившихся движений систем с геометрическими связями возможна только в критических случаях, простейшим из которых является случай нулевых корней в числе, равном количеству наложенных на систему связей. Ранее автором установлена асимптотическая устойчивость таких движений при отрицательности действительных частей остальных корней характеристического уравнения системы первого приближения автором. При наличии циклических координат появляются дополнительные нулевые корни характеристического уравнения, что существенно усложняет исследование устойчивости. В настоящей работе для решения этих более сложных задач предлагается переход к переменным Рауса с введением импульсов вместо скоростей циклических координат. Такой подход создает возможность применения как теоремы Малкина об устойчивости при постоянно действующих возмущениях, так и теоремы Каменкова об устойчивости в (существенно) особенном случае нулевых корней в количестве, равном сумме чисел геометрических связей и циклических координат. Но в результате применения теоремы Малкина (при рассмотрении в качестве постоянно действующих возмущений начальных возмущений циклических импульсов) устанавливается только неасимптотическая устойчивость по отношению ко всем фазовым переменным. Строгое применение теоремы Каменкова (с анализом структуры уравнений возмущенного движения с точки зрения замен теории критических случаев) позволяет существенно уточнить результат. В результате в этой задаче кроме общего заключения о неасимптотической устойчивости исследуемого движения получено обоснованное заключение об асимптотической устойчивости по позиционным скоростям. Очевидно, кроме теоретического интереса установленное в настоящей работе свойство асимптотической устойчивости стационарных движений по отношению к позиционным скоростям может оказаться весьма важным в технических приложениях.

**Ключевые слова:** *устойчивость, геометрические связи, критический случай.*



---

## On two methods for studying the stability of stationary motions of systems with geometric constraints

A. Ya. Krasinskiy

Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia  
E-mail: krasinsk@mail.ru

Stability of the steady-state motions of systems with geometric constraints is possible only in critical cases, the simplest of which is the case of zero roots in a number equal to the number of superimposed on the system of constraints. Earlier, the author established the asymptotic stability of such motions when the real parts of the other roots of the characteristic equation of the system of first approximation are negative. In the presence of cyclic coordinates, additional zero roots of the characteristic equation appear, which significantly complicates the study of stability. In this paper, to solve these more complex problems, we propose a transition to Routh variables with the introduction of pulses instead of cyclic coordinate velocities. Such an approach makes it possible to apply both the Malkin theorem on stability under constantly acting perturbations and the Kamenkov theorem on stability in the (extraordinary) special case of zero roots in an amount equal to the sum of the numbers of geometric constraints and cyclic coordinates. But as a result of applying Malkin's theorem (when considering the initial perturbations of cyclic pulses as constantly acting perturbations), only non-asymptotic stability is established with respect to all phase variables. A rigorous application of Kamenkov's theorem (with an analysis of the structure of the equations of perturbed motion from the point of view of substitutions of the theory of critical cases) allows us to refine the result significantly. As a result, in this problem, in addition to the general conclusion about the non-asymptotic stability of the studied motion, a valid conclusion is obtained about the asymptotic stability with respect to positional velocities. Obviously, in addition to theoretical interest, the property of the asymptotic stability of stationary motions established in this work with respect to positional velocities can be very important in technical applications.

**Keywords:** *stability, geometric constraints, critical case.*

## Моделирование динамики манипуляторов с несколькими геометрическими связями

А.Я. Красинский<sup>1,2</sup>, А.А. Юлдашев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет пищевых производств, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский авиационный институт, Москва, Россия

E-mail: krasinsk@mail.ru, izzvms@gmail.com

Для применения результатов современной теории управления в практике управления манипуляторами необходимо разработать методы моделирования их динамики. Несмотря на многочисленные исследования, многие проблемы математического моделирования динамики манипуляторов требуют дальнейшего изучения. Одно из этих направлений связано с изучением устойчивости заданного режима работы манипуляторов. Для манипуляторов с геометрическими связями точность нелинейной модели имеет особое значение, поскольку устойчивость стационарных движений таких манипуляторов возможна только в критических случаях. Изучение критических случаев требует особой точности моделирования. В данной работе на примере задачи моделирования динамики двухзвенного манипулятора с двумя нелинейными геометрическими ограничениями при учете переходных процессов в электроприводах показана практическая эффективность разработанного метода с комплексным применением результатов аналитической механики, теории нелинейной устойчивости и математической теории управления.

**Ключевые слова:** манипулятор, геометрическая связь, устойчивость.

## Modeling the dynamics of manipulators with multiple geometric relationships

A.Ya. Krasinskiy<sup>1,2</sup>, A.A. Yuldashev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow State University of Food Production, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

E-mail: krasinsk@mail.ru, izzvms@gmail.com

To apply the results of modern control theory in the practice of manipulator control, it is necessary to develop methods for modeling their dynamics. Despite numerous studies, many problems of mathematical modeling of the dynamics of manipulators require further study. One of these areas is associated with the study of the stability of a given operating mode of manipulators. For manipulators with geometric constraints, the accuracy of the nonlinear model is of particular importance, since the stability of the steady-state motions of such manipulators is possible only in critical cases. The study of critical cases requires special modeling accuracy. In this paper, the effectiveness of the developed method with the com-

plex application of the results of analytical mechanics, nonlinear stability theory and mathematical control theory is shown on the problem of modeling the dynamics of a two-link manipulator with two nonlinear geometric constraints taking into account transient processes in electric drives.

**Keywords:** *manipulator, geometric connection, stability.*

## **Зависимость захваченной массы в аккреционных дисках Юпитера и Сатурна от фрагментации планетезималей**

В.А. Кронрод<sup>1</sup>, А.Б. Макалкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, Москва, Россия  
E-mail: va\_kronrod@mail.ru

Моделируются процессы пересечения планетезималей аккреционных дисков Юпитера и Сатурна и захват их массы дисками в результате совокупности процессов аэродинамического торможения и фрагментации. Определены максимальные размеры планетезималей, которые остаются в диске вследствие взаимодействия с газовой средой и потери скорости. Найдены ограничения на размеры и материал планетезималей, масса которых после фрагментации остается в диске. Для планетезималей с прочностью  $2 \cdot 10^4 \text{ Па} < \sigma < 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$  (масштабный фактор  $\lambda = 0,2$ ) и радиусами  $0 \dots 10 \text{ км}$  определены существенные различия в захваченной массе для зон питания растущих спутников Ганимеда, Каллисто и Титана, что могло служить одной из причин малой дифференциации Каллисто и Титана по сравнению с Ганимедом.

**Ключевые слова:** *Юпитер, Сатурн, аккреционный диск, планетезимали, торможение, фрагментация.*

## **Dependence of the captured mass in accretion disks of Jupiter and Saturn from fragmentation of planetesimals**

V.A. Kronrod<sup>1</sup>, A.B. Makalkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow Russia,

<sup>2</sup>O.Y. Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia  
E-mail: va\_kronrod@mail.ru

We simulated passing of planetesimals through the circumplanetary disks of Jupiter and Saturn and capture of their material into the disks with consideration of combined processes of aerodynamic braking and frag-

mentation of planetesimals in the disk's gas medium. Below are the results of simulation for the comet material of the planetesimals. We estimated maximum planetesimal size which the body should have at the entrance to the disk in order to stay in the disk after losing velocity due to gas drag. We have obtained limitations on planetesimal at which the body is fragmented and its mass remains in the protosatellite disk. The conditions for disk capture of the entire mass of planetesimals are different for satellites. For material strength  $2 \cdot 10^4 \text{ Pa} < \sigma < 2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  (scale factor  $\lambda = 0.2$ ) a significant difference in the total masses of planetesimals with radii from 0 to 10 km capturing by the circumplanetary disks in the feeding area of Ganymede, Callisto and Titan is possible and could lead to a low differentiation of Callisto and Titan compared to Ganymede.

**Keywords:** *Jupiter, Saturn, protosatellite disk, planetesimals, aerobraking, fragmentation.*

### **Влияние сейсмических скоростей в мантии Луны на совместную инверсию геофизических и геохимических данных**

Е. Кронрод<sup>1</sup>, К. Matsumoto<sup>2</sup>, О. Кусков<sup>1</sup>, В. Кронрод<sup>1</sup>,  
R. Yamada<sup>3</sup>, S. Kamata<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт геохимии и аналитической химии  
имени В.И. Вернадского (ГЕОХИ РАН), Москва, Россия

<sup>2</sup>RISE Project, National Astronomical Observatory of Japan

<sup>3</sup>The University of Aizu, Research Center for Advanced Information

<sup>4</sup>Creative Research Institution, Hokkaido University

E-mail: e.kronrod@gmail.com

Рассматривается проблема согласования сейсмических и гравитационных данных с геохимическими моделями валового состава силикатной Луны. Задача решается методом инверсии Байеса в сочетании с методом минимизации свободной энергии Гиббса по расчету фазовых равновесий. Отличительная особенность настоящей постановки состоит во включении геохимических параметров силикатной Луны в качестве «наблюденных» величин при расчете функции правдоподобия. Определено значение погрешности во временах пробега сейсмических волн, наилучшим образом удовлетворяющее совокупности геофизических и геохимических ограничений.

**Ключевые слова:** *Луна, численное моделирование, инверсия, внутреннее строение, термодинамика, сейсмические скорости.*

## The effect of in seismic velocities in the lunar mantle on the joint inversion of geophysical and geochemical data

E. Kronrod<sup>1</sup>, K. Matsumoto<sup>2</sup>, O. Kuskov<sup>1</sup>, V. Kronrod<sup>1</sup>,  
R. Yamada<sup>3</sup>, S. Kamata<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Vernadsky Institute of Geochemistry and  
Analytical Chemistry (GEOKHI RAS), Moscow, Russia

<sup>2</sup>RISE Project, National Astronomical Observatory of Japan

<sup>3</sup>The University of Aizu, Research Center for Advanced Information

<sup>4</sup>Creative Research Institution, Hokkaido University

E-mail: e.kronrod@gmail.com

The problem of matching of seismic and gravity data with geochemical models of the bulk composition of the silicate Moon was considered. The problem was solved with Bayesian inversion method in combination with Gibbs free energy minimization method for calculation of phase equilibria. A distinctive feature of this statement is the inclusion of the geochemical parameters of the silicate Moon as the “observed” values in the calculation of the likelihood function (LHF). The value of the error in the travel times of seismic waves, which best satisfies the combination of geophysical and geochemical constraints, was estimated.

**Keywords:** Moon, numerical modeling, inversion, internal structure, thermodynamics, seismic velocities.

## Моделирование динамики сельскохозяйственных машин, транспортирующих емкости, частично заполненные жидкостью

М.Г. Кузнецова<sup>1</sup>, М.А. Бойкачев<sup>1</sup>, Г.И. Кошля<sup>2</sup>

<sup>1</sup>БелГУТ, Гомель, Беларусь

<sup>2</sup>БГАТУ, Минск, Беларусь

E-mail: tm.belsut@gmail.com, kgi.emtp@bsatu.by

В сельскохозяйственном производстве при выполнении значительного числа технологических операций возникает необходимость транспортировки жидкостей: жидких химических удобрений, молока, продуктов нефтепереработки и др. Особенность работы цистерн и агрегатов с навесными емкостями для жидкостей связана с необходимостью перевозки полезного груза при частичном заполнении резервуара. Колебания жидкости в таком случае могут при некоторых параметрах движения транспортного средства приводить к потере управляемости и аварийным ситуациям, связанным в том числе и с человеческими жертвами.

Сельскохозяйственная машина, транспортирующая жидкость, представляет собой сложную механическую систему, которая может перемещаться как по дорогам общего пользования, но и по бездорожью. Поэтому на ее динамику и устойчивость оказывает влияние большое количество случайных факторов, которые должны учитываться при разработке новой и модернизации существующей техники. Цель представленной работы — анализ влияния колебаний жидкости в частично заполненных резервуарах сельскохозяйственных машин на устойчивость их прямолинейного движения и опасность поперечного опрокидывания при разных условиях движения.

На основе развития подходов, предложенных ранее А.О. Шимановским, выполнены расчеты переходных режимов движения новой конструкции цистерны, внутри резервуара которой расположена система подвижных перегородок, связанных между собой единым стержнем, выходящим наружу и передающим возникающие силы инерции на платформу через торсионы, работающие на кручение. На основе использования аналитических методов и конечно-элементного моделирования показано, что использование торсионов позволяет снизить возникающие при резких разгонах и торможениях силы, действующие на резервуар со стороны колеблющейся жидкости, что повышает его долговечность.

Теоретически также рассмотрены особенности динамики машинно-тракторного агрегата на основе производимого ОАО «Гомсельмаш» универсального энергетического средства УЭС-2-250(280)А «Полесье» при оснащении его навесной емкостью для жидкого груза объемом до 1500 л. На основе применения аналитической модели, в которой жидкость заменяется эквивалентным твердым телом, показано, что устойчивость прямолинейного движения рассматриваемого транспортного средства обеспечивается при ширине резервуара, не превышающей 1,5 м. Также установлено, что при расположении емкости с жидкостью на высоте 1,075 м над землей и массе навесной емкости, не превышающей 1500 кг, движение УЭС по поверхностям с поперечным уклоном является устойчивым.

Проведены эксперименты по определению виброускорений точек в раме агрегата при различных режимах движения УЭС по асфальту и по стерне при разных уровнях заполнения навесного бака водой. Их результаты показали, что разброс амплитуд колебаний велик при полном и пустом баках и укладывается в достаточно небольшой диапазон при заполнении резервуара на 60 %. Такой результат свидетельствует о том, что колебания жидкости внутри емкости способствуют сглаживанию эффектов, возникающих под действием импульсных нагрузок вследствие наезда на неровности почвы.

Выполненные исследования позволили выработать рекомендации по усовершенствованию конструкций сельскохозяйственных машин, предназначенных для транспортировки жидкостей.

**Ключевые слова:** цистерна, машинно-тракторный агрегат, колебания жидкости, частично заполненный резервуар, устойчивость движения.

## **Modeling of the dynamics of agricultural machines transporting tanks partially filled with liquid**

M.G. Kuzniatsova<sup>1</sup>, M.A. Baikachou<sup>1</sup>, H.I. Koshlya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

<sup>2</sup> Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus

E-mail: tm.belsut@gmail.com; kgi.emtp@bsatu.by

In agricultural production at a significant number of technological operations it becomes necessary to transport liquids: liquid chemical fertilizers, milk, oil products, etc. The peculiarity of the operation of tanks and units with mounted reservoirs for liquids is related to the need to transport a payload with the partial filling of the tank. The liquid cargo oscillations in this case can, for some vehicle motion parameters, lead to loss of controllability and emergency situations, associated with human victims either.

An agricultural machine transporting liquid is a complex mechanical system that can move both along public roads, but also off-road. Therefore, its dynamics and stability is influenced by a large number of random factors that must be taken into account when developing new and modernizing existing equipment. The purpose of this work is to analyze the effect of liquid oscillations in partially filled tanks of agricultural machines on the stability of their rectilinear motion and the danger of lateral tipping over under different motion conditions.

Based on the development of the approaches proposed earlier by A.O. Shimanovsky, the transition modes of the road tanks of new designs are computed, there is considered a system of movable partitions inside the tank connected by a single rod that goes out and transfers the arising inertia forces to the platform through the torsion bars working on torsion. Using the analytical methods and finite element modeling, it is shown that the use of torsions allows to reduce the forces arising from sudden acceleration and braking acting on the tank from the side of the oscillating liquid, which increases its durability.

There also investigated the theoretical features of a machine-tractor unit dynamics based on the universal power tool UES-2-250 (280) A Polesye produced by the Gomselmash enterprise, equipped with a hinged reservoir for liquid cargo of up to 1,500 liters. Based on the application of the analytical model with the liquid replaced by an equivalent solid body,

it is shown that the stability of the vehicle rectilinear movement is ensured for a tank width not exceeding 1.5 m. It was also established that at the reservoir location at a height 1,075 m above the ground and the hinged capacity mass of the not exceeding 1,500 kg, the movement of the UES on surfaces with a transverse slope is stable.

Experiments were carried out to determine the vibration accelerations of the points of the unit frame under various modes of the UES on asphalt and stubble at different levels of the hinged reservoir filling by water. Their results showed that the oscillations amplitudes distribution is large at full and empty reservoirs and fits into a fairly small range when its filling is about 60%. This result indicates that liquid oscillations inside the tank contribute to smoothing out the effects that occur under the action of impulse loads due to collision with uneven soil.

The performed investigations made it possible to develop recommendations for improving the design of the agricultural machines designed for transporting liquids.

**Keywords:** *road tank, machine-tractor unit, liquid oscillations, partially filled reservoir, movement stability.*

## **Плоский диффузор: стационарные течения вязкой несжимаемой жидкости**

С.А. Кумакшев

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия  
E-mail: kumak@ipmnet.ru

Для классической постановки задачи Джеффри — Гамеля исследована эволюция основного одномодового (с постоянной по знаку скоростью потока в зависимости от угла раствора диффузора) стационарного течения вязкой несжимаемой жидкости в плоском диффузоре. В зависимости от определяющих параметров (угла раствора диффузора и числа Рейнольдса) дано полное решение задачи. Показан переход основного одномодового течения, при фиксированном значении угла раствора, к многомодовым режимам (у которых скорость потока меняет знак в зависимости от угла раствора) при изменении числа Рейнольдса. Установлено, что начиная с некоторого критического значения числа Рейнольдса существование стационарного одномодового течения невозможно. Построена соответствующая диаграмма бифуркации, ранее не известная в научной литературе, посвященной задаче Джеффри — Гамеля. Показана возможность реализации как одномодового, так и многомодовых течений при одном и том же числе Рейнольдса.



*Работа выполнена по теме государственного задания (№ АААА-А17-117021310387-0) и частично поддержана грантами РФФИ (№ 17-01-00538, 18-01-00812, 17-08-00742).*

**Ключевые слова:** *плоский диффузор, задача Джеффри — Гамеля, стационарные течения, вязкая жидкость.*

## **Plane diffuser: steady state flow of a viscous incompressible fluid**

S.A. Kumakshev

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia  
E-mail: kumak@ipmnet.ru

For the classical formulation of the Jeffrey-Hamel problem, the evolution of the main single-mode (with a constant flow rate solution depending on the angle of the diffuser) steady flow of a viscous incompressible fluid in a flat diffuser is studied. Depending on the determining parameters (the angle of the diffuser and the Reynolds number), a complete solution of the problem is given. The transition of the main single-mode flow, at a fixed value of the angle of the diffuser, to the multimode mode (in which the velocity of flow rate changes sign with respect to the angle of the diffuser) with a change in the Reynolds number is shown. It is found that starting from a certain critical value of the Reynolds number, the existence of a stationary single-mode flow is impossible. The corresponding bifurcation diagram, previously unknown in the scientific literature devoted to the Jeffrey — Hamel problem, is constructed. The possibility of realization of both single-mode and multimode flows at the same Reynolds number is shown.

**Keywords:** *flat diffuser, Jeffrey — Hamel problem, steady flow, viscous incompressible fluid.*

## **Шагающее колесо**

В.В. Лапшин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: lapshin032@bmstu.ru

В нелинейной постановке аналитически исследована плоская задача о движении шагающего колеса вниз по наклонной плоскости, которая является простейшей моделью двуногой ходьбы. Исследованы возможные случаи движения шагающего колеса при различных значениях наклона опорной поверхности и начальной угловой скорости колеса. Показано, что возможны различные режимы движения

шагающего колеса, наиболее интересным из которых является существование устойчивого периодического решения (автоколебаний).

**Ключевые слова:** нелинейная динамика, двуногая ходьба, автоколебания, шагающее колесо, колесо без обода.

## Walking wheel

V.V. Lapshin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: lapshin032@bmstu.ru

The dynamics of a 2D walking wheel motion down an inclined plane is analytically investigated in nonlinear formulation. It is the simplest model of a bipedal walking. The possible cases of the motion of the walking wheel are investigated at various values of the inclination of the support surface and the initial angular velocity of the wheel. It is shown that various modes of motion of the walking wheel are possible. The most interesting of which is the existence of a stable periodic solution (self-oscillations).

**Keywords:** nonlinear dynamics, bipedal walking, self-oscillations, walking wheel, rim-less wheel.

## О неявных уравнениях движения механических систем

В.В. Лапшин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: lapshin032@bmstu.ru

В работе показано, что силы, действующие на точки механической системы, могут зависеть от ускорений точек системы. Система дифференциальных уравнений движения механической системы называется неявной. Она не разрешена относительно старших производных. Возникают принципиальные математические проблемы, связанные с возможностью и единственностью разрешения этих уравнений относительно старших производных. Неявные уравнения движения характерны для механических систем с сухим трением скольжения и качения. В динамике точки подобных проблем не возникает. Но в более сложных механических системах, в том числе и при исследовании движения твердого тела, вся масса которого сосредоточена в одной точке, а также в системах с одной степенью свободы подобная ситуация является весьма характерной.

В работе рассмотрены четыре примера механических систем, движение которых описывается неявными дифференциальными

уравнениями. В первых двух примерах рассматриваются движение стержня, скользящего по шероховатому горизонтальному полу и шероховатой вертикальной стене, и качения колеса со смещенным центром масс при наличии момента трения качения. В этих примерах уравнения движения легко разрешаются относительно старшей производной. Третий пример, в котором рассматривается эллиптический маятник, является несущественно модифицированным примером Пэнлеве, который привел к знаменитым парадоксам Пэнлеве. Парадоксы Пэнлеве заключаются в том, что при больших значениях коэффициента трения возможны ситуации, когда дифференциальные уравнения движения неразрешимы относительно старших производных (т. е. движение системы невозможно) или имеют несколько решений. В четвертом примере рассмотрен математический маятник, в шарнире которого имеется момент сухого трения, пропорциональный полной реакции в этом шарнире. Неявное дифференциальное уравнение движения при этом является иррациональным уравнением относительно старшей производной. При большом трении возникает парадокс, аналогичный парадоксу Пэнлеве.

Отметим также, что во всех рассмотренных примерах после разрешения неявных уравнений движения относительно старших производных сухое трение приводит к появлению сил (моментов) сопротивления, пропорциональных квадрату скорости, т. е. сухое трение проявляется в том числе и как вязкое.

**Ключевые слова:** *нелинейная динамика, неявные уравнения движения.*

## On the implicit equations of mechanical systems motion

V.V. Lapshin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: lapshin032@bmstu.ru

It is shown that the forces acting on the points of the mechanical system may depend on their accelerations. The differential equations of a mechanical system motion of prove to be implicit. It is not allowed with respect to higher derivatives. There are fundamental mathematical problems related to the possibility and the only solution of these equations with respect to higher derivatives. Implicit equations of motion are typical for mechanical systems with dry friction sliding and rolling. In the dynamics of material point such problems do not arise. But in more complex mechanical systems, including the study of the motion of a solid whole mass is concentrated at one point, as well as in systems with one degree of freedom, such a situation is very characteristic.

The paper discusses four examples of mechanical systems movement, which is described by implicit differential equations of motion. In the first

two examples, we consider the motion of the rod sliding across the harsh rough horizontal floor and a vertical wall, rolling wheels with an offset center of mass in the presence of rolling friction. In these examples, the equations of motion can be easily solved for the highest derivative. The third example is modified Painleve example, where the investigation of the motion of an elliptical pendulum leads to the well-known Painleve paradoxes. In the case of the large values of the coefficient of friction, there may be situations, when the differential equations of motion can not be solved with respect to higher derivatives (i.e., the motion of the system is not possible) or have multiple solutions. In the fourth example of the mathematical pendulum hinge that there is a moment of dry friction is proportional to the overall reaction in the hinge. Implicit differential equation of motion in this case is an irrational equation for the highest derivative. When there is large values of the coefficient of friction, paradoxes similar Painleve paradoxes are obtained.

We also note that in all the examples after the tacit permission of the equations of motion with respect to the highest derivatives dry friction gives rise to forces (moments) resistance is proportional to the square of the velocity, ie dry friction is partly shown as viscous friction.

**Keywords:** *nonlinear dynamics, implicit equations of motion.*

## **О моделировании аэродинамического воздействия на аэродинамический маятник**

Б.Я. Локшин, Ю.Д. Селюцкий

НИИ механики МГУ, Москва, Россия

E-mail: blokshin@imec.msu.ru

В прикладной аэродинамике для описания нестационарного аэродинамического воздействия используется понятие мгновенного центра давления, положение которого в каждый момент времени зависит не только от ориентации, но и от угловой скорости тела. Однако для несимметричных тел и некоторых положений оси вращения такой подход оказывается неэффективным. В сообщении предлагается другой подход к построению адекватной математической модели, опирающийся на использование информации о скоростях двух фиксированных точек тела. Экспериментально известное силовомоментное воздействие «разлагается» на силовое воздействие двух сил, приложенных в выбранных точках. Эти силы считаются зависящими от мгновенных значений углов атаки и воздушных скоростей в этих точках. Поскольку углы атаки различны из-за вращения объекта, то при таком способе описания аэродинамической нагрузки учитывается не только ориентация объекта относительно потока, но его угловая

скорость. Расчеты, проведенные для однозвенного аэродинамического маятника, показали работоспособность предложенного подхода.

**Ключевые слова:** колебания, маятниковые системы, квазистатический подход, аэродинамика.

## On simulation of aerodynamic load on aerodynamic pendulum

B.Ya. Lokshin, Yu.D. Selyutskiy

Institute of Mechanics of Lomonosov MSU, Moscow, Russia

E-mail: blokshin@imec.msu.ru

In applied aerodynamics, concept of instantaneous center of pressure is used to describe the aerodynamic load. Position of this point depends both on orientation and angular speed of the body. However, such approach proves to be not efficient for non-symmetric bodies and certain locations of the rotation axis. In this work, another approach to construction of an adequate mathematical model is proposed based on use of information about velocities of two fixed points of the body. Forces and torques known from experiments are “represented” as action of two forces applied in the selected points. These forces are supposed to depend on instantaneous angles of attack and airspeeds of these points. As these angles of attack are different due to rotation of the object, such method of description of the aerodynamic load take into account both orientation of the body with respect to the flow and its angular speed. Calculations performed for the simple aerodynamic pendulum show the efficiency of the proposed approach.

**Keywords:** *pendulum systems, quasi-steady approach, aerodynamics.*

## Эмпирическая модель воздействия потока на ротор Савониуса и ее приложения

А.А. Мастерова, Ю.Д. Селюцкий

НИИ механики МГУ, Москва, Россия

E-mail: masterovaanya@yandex.ru

В работе предложен эмпирический метод для моделирования аэродинамического момента, действующего на ротор Савониуса в потоке среды. Рассматриваемый подход обеспечивает достаточно хорошее интегральное описание аэродинамической нагрузки на вращающийся объект. Это позволяет при решении задач оптимизации достаточно оперативно определить область параметров, в которой

следует ожидать «оптимального» поведения системы, избегая время-емких и ресурсоемких вычислений. На основе этого метода проанализирована динамика механической системы, представляющей собой колесную тележку с ротором Савониуса в качестве привода.

**Ключевые слова:** ветроэнергетическая установка, ротор Савониуса, аэродинамический момент, ветроприемное устройство, механическая система, математическое моделирование.

## **Empirical model of flow impact on the Savonius rotor and its applications**

A.A. Masterova, Yu.D. Selyutskiy

Institute of Mechanics of Lomonosov MSU, Moscow, Russia  
E-mail: masterovaanya@yandex.ru

An empirical method for describing the aerodynamic torque acting on the Savonius rotor in flow is proposed. The considered approach provides sufficiently good integral description of the aerodynamic load on rotating object. This allows for quick determination of the area in parameter space where the “optimal” behavior of the system is expected, without having to use time-intensive and resource-intensive computations. Using this method, dynamics of mechanical system is studied representing a wheeled cart with a Savonius rotor as a drive.

**Keywords:** wind turbine, wind power, dynamics, Savonius rotor, wind-driven cart.

## **Динамика колесного инерциоида**

П.К. Махмудов<sup>1</sup>, В.А. Самсонов<sup>2</sup>, М.З. Досаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>НИИ механики МГУ, Москва, Россия  
E-mail: fillipmacgreen@gmail.com

Рассмотрена колесная тележка, движущаяся по шероховатой плоскости без проскальзывания. Механическая система состоит из корпуса на колесах и ползунка, который может двигаться по прямой, закрепленной в корпусе. Предложен алгоритм циклического движения, разделенного на три этапа. В конце каждого цикла ползунок возвращается в исходное положение, а каретка смещается на ненулевое расстояние. При смене этапов происходят удары тележки об опорную плоскость. Приведены численные расчеты движения тележки для выбранных значений параметров.

**Ключевые слова:** инерциоид, удар, алгоритм.

## Dynamics of wheeled inertioïd

P.K. Makhmudov<sup>1</sup>, V.A. Samsonov<sup>2</sup>, M.Z. Dosaev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LMSU Faculty of Mechanics and Mathematics, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institute of Mechanics of Lomonosov MSU, Moscow, Russia

E-mail: fillipmacgreen@gmail.com

A wheeled cart moving along a rough plane without slipping is considered. The mechanical system consists of a wheeled body and a slider that can move along straight line fixed in the body. The algorithm of cyclic motion is proposed divided into three stages. At the end of each cycle, the slider returns to its original position, and the cart shifts by a nonzero distance. When changing stages, impacts occur on the supporting plane. The numerical calculations of the motion of the cart are presented for selected values of parameters.

**Keywords:** *inertioïd, impact, algorithm.*

## Методика оцувствления мехатронных комплексов медицинского назначения

И.А. Мещихин, С.С. Гаврюшин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: sagezz@yandex.ru

Современный уровень развития микроэлектроники — приводов и систем управления — открывает новые возможности в таких прикладных сферах, как протезирование. Управляемость мехатронных систем определяется, в том числе, точностью средств измерений. Для силомоментного оцувствления с учетом требований к массово габаритным характеристикам необходимы оригинальные решения. Конкурентное преимущество разрабатываемых решений обеспечивается отказом от универсальности по отношению к модели нагружения, что позволяет добиться требуемой точности для целей управления.

**Ключевые слова:** *силомоментный датчик, метод конечных элементов, информационно-измерительная система.*

## Methods of sensing mechatronic complexes for medical purposes

I.A. Meshikhikhin, S.S. Gavryushin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: sagezz@yandex.ru

The current level of development of microelectronics: drives and control systems, opens up new possibilities in such applied areas as prosthetics. The controllability of mechatronic systems is determined, inter alia, by the accuracy of measuring instruments. For force momentary sensation, taking into account the requirements for mass-dimensional characteristics, original solutions are needed. The competitive advantage of the developed solutions is provided by the rejection of universality with respect to the loading model, which allows to achieve the required accuracy for control purposes.

**Keywords:** *force-torque sensor, finite element method, information-measuring system.*

## Построение программной траектория в конфигурационном пространстве вращений для решения задачи о плавном развороте твердого тела

Е.А. Митюшов, Н.Е. Мисюра, А.Е. Ламоткин

Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия  
E-mail: mityushov-e@mail.ru, n\_misura@mail.ru, alexey.lamotkin@urfu.ru

В работе предлагается метод получения программного управления, основанный на концепции решения обратной задачи динамики [1]. Согласно [2], в качестве конфигурационного пространства поворотов может быть выбран шар радиусом  $\pi$ . В качестве конфигурационного пространства вращений авторами рассматривается геометрический образ — шар радиусом  $2\pi$  трехмерного евклидова пространства. При решении некоторых прикладных задач управления движением траектории в шаре являются непрерывными и позволяют наглядно интерпретировать сферическое движение твердого тела движением точки по траектории в этом шаре.

Установлена линейная связь вида между вектором угловой скорости твердого тела в его сферическом движении и скоростью движения точки в шаре при задании движения точки в шаре в виде полинома пятой степени. Данное соотношение может быть использовано для



описания плавного разворота динамически несимметричного твердого тела с заданными произвольными условиями по угловым положениям и скоростям. Управление, реализующее данное движение, может быть найдено из динамических уравнений Эйлера.

В качестве примера [3] приводится плавный разворот твердого тела из одной заданной ориентации в другую заданную ориентацию, с краевыми условиями для угловых скоростей и угловых ускорений за определенное время.

**Ключевые слова:** конфигурационное пространство вращений, плавный разворот, программное управление.

### Литература

1. Ермошина О.В., Крищенко А.П. Синтез программных управлений ориентации космического аппарата // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2000. № 2. С. 155–162.
2. Арнольд В.И. Геометрия комплексных чисел, кватернионов и спинов. Москва: Моск. центр непрерывного математич. образования, 2002. 40 с.
3. Митюшов Е.А., Мисюра Н.Е. Траектория плавного разворота твердого тела в шаре радиусом  $2\pi$  [Электронный ресурс]. URL: <https://youtu.be/W5H1uSw4Q7o> (дата обращения: 25.10.2019).

## Constructing a programmed trajectory in the configurational space of rotations for the solution of problems on the smooth rotation of a rigid body

E. A. Mityushov, A.E. Lamotkin, N.E. Misyura

Ural Federal University named after  
the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia  
E-mail: mityushov-e@mail.ru, n\_misura@mail.ru, alexey.lamotkin@urfu.ru

In this work, a method is presented to achieve a programmed control, based on the concepts of the solutions found to the respective problems in dynamics [1]. According to [2], the configurational space can be taken to be a sphere of radius  $\pi$ . As the configurational space of rotations, the following geometrical concept was used by the authors — a sphere of radius  $2\pi$  of three dimensional Euclidian space. When solving certain applied problems of motion control, the trajectories within the sphere are continuous and allow for a direct interpolation of the spherical motion of a rigid body through the motion of point along a trajectory in this sphere.

When defining the motion of the point within the sphere in the form of a fifth order polynomial, a linear relationship is established of the form between the angular velocity vector of the rigid body in its spherical motion and the velocity of the point's motion within the sphere. This relationship can be used for the description of the smooth rotation of a dynamically

asymmetrical rigid body with arbitrarily defined conditions of angular positions and velocities. The control, which produces this motion, can be found from Euler's dynamic equations.

An example of the smooth rotation of a rigid body is given [3].

**Keywords:** *configurational space of rotations, smooth rotation, programmed control.*

### References

1. Ermoshina OV, Krishchenko AP, Synthesis of software controls the orientation of the spacecraft. *Izv. RAS. Theory and control systems*, 2000, no. 2, pp. 155–162.
2. Arnold V.I. *The geometry of complex numbers, quaternions and spins*. Moscow, Moscow Center for Continuing Mathematical Education, 2002. 40 p.
3. Mityushov E.A., Misyura N.E. *The trajectory of a smooth rotation of a solid in a ball with a radius of  $2\pi$*  [Electronic resource]. Available at: <https://youtu.be/W5H1uSw4Q7o> (accessed: 10.25.2019).

## Численное моделирование течения в ближнем следе при дозвуковом обтекании вращающихся летательных аппаратов в открытом пакете OpenFOAM

А.А. Мичкин, Е.Г. Столярова, Я.В. Ухналева

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: michkin\_a@mail.ru

Движение летательных аппаратов (ЛА) различного назначения может сопровождаться вращением. При обтекании подобных тел воздушным потоком возникает как дополнительная составляющая интегральных аэродинамических характеристик, связанная с эффектом Магнуса, так и происходит трансформация течения вблизи элементов, имеющих угловую скорость вращения.

Весовые, дренажные и визуализационные исследования, проведенные в дозвуковой аэродинамической трубе МГТУ им. Н.Э. Баумана, показывают, что при продольном обтекании осесимметричных тел, имеющих угловую скорость вращения  $\omega_x$ , происходит изменение распределения давления в следе за аппаратом при наличии отрыва потока на поверхности вращающихся ЛА: отрывная зона изменяется. Получены аэродинамические характеристики и структуры течения.

На кластере «Ломоносов» и вычислительных ресурсах МГТУ им. Н.Э. Баумана была проведена серия численных экспериментов в открытом пакете OpenFOAM. Рассматривалось продольное обтекание вращающейся модели летательного аппарата цилиндрической формы в широком диапазоне угловых скоростей и углов атаки.

Система уравнений Навье — Стокса, осредненная по Рейнольдсу, дополнялась  $k-\omega$  SST-моделью или ее модификацией, созданной на основе поправки Смирнова — Менстера. При моделировании рассматривались различные подходы к заданию вращения.

Использование классической  $k-\omega$  SST-модели и задание на поверхности вращающегося осесимметричного тела граничного условия по скорости  $v = \omega_x * r$ , где  $r$  — расстояние до оси, не позволило получить правильное распределение давления в следе за аппаратом, структуру течения на его поверхности, что приводит к появлению существенной ошибки при определении коэффициента продольной силы.

Расчет с использованием поправки Смирнова — Менстера и того же ГУ дает возможность получить достоверную картину течения в отрывной зоне на поверхности вращающегося тела. Для получения корректного распределения давления в ближнем следе необходимо рассмотреть задание вращательного движения модели как сложного и использование относительной системы отсчета (ReferenceFrame) или использование обобщенного сеточного интерфейса (ArbitraryMeshInterface).

**Ключевые слова:** вращающиеся летательные аппараты, сила Магнуса, отрывные течения OpenFOAM.

## Numerical simulation of flow in near wake of rotating aircraft at subsonic flow in the open source code OpenFOAM

A.A. Michkin, E.G. Stolyarova, Y.V. Ukhnaeva

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: michkin\_a@mail.ru

Different purpose flight vehicle motion can be accompanied by rotation. An additional component of the integral aerodynamic characteristics associated with the Magnus effect and a flow transformation occurs near the elements having rotational speed in case of flowing with airflow

Weight, draining and visualization researches carried out in the subsonic wind tunnel of Bauman Moscow State Technical University. Results show that during longitudinal flow of axisymmetrical bodies having rotational speed  $\omega_x$  happening a change of the pressure distribution in the wake after the vehicle. The take-off zone changes take place in case of flow separation on the rotation vehicle surface. Aerodynamic characteristics and flow patterns are obtained.

A series of numerical experiments were carried out in the open source code OpenFOAM on the cluster “Lomonosov” and computational resources of BMSTU. There were simulations of longitudinal flow around

rotating cylindrical shape flight vehicle in wide range of angular speeds and angles of attack. A  $k-\omega$  SST model or its modification based on the Smirnov-Menter correction supplemented the Navier-Stokes system of equations averaged by Reynolds. Different attitudes to setting up the rotation were considered in the simulation.

Using of the classic  $k-\omega$  SST model coupled with surface velocity boundary condition where speed  $v = \omega_x * r$ ,  $r$  — is the distance to the axis, did not allow to obtain the correct pressure distribution in the wake after the body and detached flow on the surface, which leads to a significant error in determining the coefficient of longitudinal force.

Calculation using of Smirnov-Menter correction and the same boundary condition makes it possible to obtain a certain flow picture in the take-off zone on the surface of the rotating body. To get the correct pressure distribution in the near wake, it needs to consider specifying the rotational motion using the Reference Frame or the Arbitrary Mesh Interface.

**Keywords:** *spinning vehicle, rotating body, Magnus force, OpenFOAM, detached flow.*

## **Идеи реформации русской инженерной школы в подходе А.С. Ершова**

Д.А. Мкртычян

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: dmkrtychyan@mail.ru

Вторая треть XIX в. была для России периодом промышленного переворота, временем перехода от мануфактурного к крупному машинному производству. Для развивающейся промышленности России требовалось большое количество квалифицированных специалистов. Насущным стал вопрос подготовки своих технических кадров. Прогрессивные деятели того времени стояли за всемирное развитие технического образования, за перестройку и развитие общего и специального среднего образования.

Одним из таких деятелей был Александр Степанович Ершов.

Деятельность А.С. Ершова сыграла большую роль в истории отечественной техники и особенно в машиностроительной промышленности. Он был одним из ученых того времени, которые следовали принципу неразрывности теории и практики. А.С. Ершов явился одним из основателей Московской школы теории механизмов. Дальнейшее развитие, совершенствование этой школы было осуществлено такими учеными, как Чебышев, Орлов, Мерцалов, Смирнов, Артоболовский, Решетов, Гавриленко. А.С. Ершов — создатель пер-

вого учебника на русском языке по практической механике. Именно А.С. Ершов основал коллекцию моделей механизмов кабинета «Прикладной механики» кафедры ТММ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор технических статей и обзоров, А.С. Ершов был популяризатором технических знаний. Он живо отзывался на всякое явление или нововведение в области техники. Основоположник русского метода инженерного образования, основанного на неразрывной связи глубокого теоретического обучения с практическим применением знаний в условиях мастерских, фабрик и заводов. Благодаря Александру Степановичу в 1868 г. Московское ремесленное учебное заведение было официально преобразовано в высшее техническое учебное заведение и получило наименование Московского технического училища.

**Ключевые слова:** инженерное образование, учебный процесс, наука, практическая механика, Императорское Московское техническое училище, А.С. Ершов, машиностроение, промышленность, русский метод обучения.

#### Литература

1. Мкртычян Д.А. Состояние механики и практической механики в России до середины XIX в. // Теория механизмов и машин. 2016. № 4 (32), том 14. С. 229–236.

### Ideas of reformation of Russia engineering school in A.Yershov approach

D.A. Mkrtychian

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail:dmkrtychyan@mail.ru

The article is devoted to A. Yershov who was an outstanding scientist, reformer, the founder of the Russian method of engineering education. The basics and methods of teaching technical Sciences in the 19th century on the example of the Imperial Moscow Technical School are considered. And also the role of A. Yershov in the formation of the Russian method of teaching engineering Sciences, based on a combination of theoretical and practical training.

#### References

1. Mkrtychyan D.A. Sostoyaniye mekhaniki i prakticheskoy mekhaniki v Rossii do serediny XIX veka [Mkrtychyan D.A. The state of mechanics and practical mechanics in Russia until the middle of the 19th century]. *Teoriya mekhanizmov i mashin — Theory of mechanisms and machines*, 2016, no. 4 (32), volume 14, pp. 229–236.

## Стабилизация связей в системах непрямого регулирования

Р.Г. Мухарлямов

РУДН, Москва, Россия,  
E-mail: robgar@mail.ru

Излагается метод решения задачи управления целенаправленным движением системы с учетом динамики исполнительных устройств. Цель управления и кинематические свойства системы определяются связями, наложенными на фазовые координаты объекта управления. Учет динамики исполнительных органов приводит к задаче стабилизации связей, требующей использования производных от уравнений связей более высокого порядка. Установлены условия устойчивости инвариантного множества, соответствующего уравнениям связей, и ограничения отклонений от уравнений связей при численном решении уравнений динамики замкнутой системы. Приведен алгоритм решения задачи управления элементом адаптивной оптической системы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-00261).*

**Ключевые слова:** динамика, система, устойчивость, уравнения, связи, стабилизация.

## Constraint stabilization in the system of indirect control

R.G. Mukharlyamov

RUDN University, Moscow, Russia,  
E-mail: robgar@mail.ru

The method of solving the problem of controlling the aimed movement of the system taking into account the dynamics of final control devices is described. The purpose of control and kinematic properties of the system are determined by the constraints imposed on the phase coordinates of the control object. Taking into account the dynamics of final control devices leads to the problem of constraint stabilization, which requires the use of derivatives of higher order constraint equations. The stability conditions of the invariant set, which corresponds to the constraint equations, and the conditions for limiting deviations from the constraint equations in the numerical solution of the dynamics equations of closed system are established. An algorithm for solving the control problem of an element of adaptive optical system is considered.

*This work is supported by RFBR (project No. 19-08-00261 A).*

**Keywords:** dynamics, system, stability, equations, relations, stabilization.

## Термодинамические свойства сапфира при высоких давлениях

Д.Н. Николаев, А.В. Острик

Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Россия

E-mail: nik@fcp.ac.ru, ostrik@fcp.ac.ru

Для расчета высокоскоростного взаимодействия неоднородных сред и конструкций требуются уравнения состояния (УРС) материалов в широкой области фазовой диаграммы. При построении широкодиапазонных УРС необходимы данные ударно-волновых исследований. Сапфир широко используется в опытах по измерению температур ударного сжатия металлов и их сплавов. До настоящего времени ударная сжимаемость сапфира экспериментально определялась в диапазоне давлений 80...340 ГПа, создаваемых двухступенчатыми газовыми пушками. Действие излучения мощных лазеров применялось для измерения ударной сжимаемости при давлениях 0,7...2 ТПа.

Область давлений 340...700 ГПа ранее экспериментально не изучалась. В данной работе давления этого диапазона создавались кумулятивным генератором ударного сжатия. Температура за фронтом ударной волны, распространяющейся в сапфире, измерялась методами оптической пирометрии.

При построении УРС сапфира в области сжатия использовалась аппроксимация ударной адиабаты, полученная И. Керли (I. Kerley). Удельная теплоемкость сапфира рассчитывалась по теории Дебая. Вклад электронной компоненты не принимался во внимание, так как при нормальных условиях сапфир является диэлектриком.

В результате проведенных исследований экспериментально определены ударно-волновые характеристики сапфира и построены его УРС в области сжатия. Получено удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных для температур за фронтом ударной волны в сапфире.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 18-08-00964-а).*

**Ключевые слова:** сапфир, оконные материалы, ударно-волновые эксперименты, ударная адиабата, уравнения состояния вещества.

## Thermodynamic properties of sapphire at high pressures

D.N. Nikolaev, A.V. Ostrik

Institute of Problems of Chemical Physics of the RAS, Chernigolovka, Russia

E-mail: nik@fcp.ac.ru, ostrik@fcp.ac.ru

Equations of state (EOS) are required in a wide area of phase diagram of substance to calculate the high-speed interaction of non-uniform media and constructions. Shock compression data are necessary to construct

wide-range EOS. Sapphire is widely used as window material in experiments to measure shock compression temperatures of metals and alloys. The shock compressibility of sapphire was experimentally determined in the pressure range of 80...340 GPa generated by two-stage gas gun. The action of powerful lasers was used to measure shock compressibility at pressures of 0.7...2 TPa.

Previously, the region of pressure 340...700 GPa was not experimentally studied. In our research the pressures of this range were created by the cumulative shock compression generator. The temperature behind the front of the shock wave propagating in the sapphire was measured by optical pyrometry technique.

An approximation of the shock adiabat obtained by I. Kerley was used to calculate sapphire EOS in the compression region. The specific heat capacity of sapphire was calculated according to Debay theory. The contribution of the electronic component was not taken into account because under normal conditions sapphire is dielectric.

The shock-wave characteristics of sapphire were experimentally determined at pressures 340...700 GPa. The equations of state were constructed up to pressures 2 TPa. Satisfactory agreement was obtained between the numerical results and experimental data for the temperatures behind the shock wave front propagating in the sapphire.

*Work was supported by the Russian Foundation of Basic Researches (No. 18-08-00964-a).*

**Keywords:** *sapphire, window materials, shock-wave experiments, shock adiabat, equations of state for substance.*

## **Влияние сжатия Земли на скорость движения изображений при оптико-электронной съемке поверхности планеты**

И.М. Никулкина, А.В. Шатина

МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия  
E-mail: shatina\_av@mail.ru

Цель работы — получение формул для расчета скорости движения изображения в фокальной плоскости при космической съемке поверхности планеты с помощью бортовой оптико-электронной аппаратуры в надир с учетом сжатия Земли. Земля моделируется абсолютно твердым однородным эллипсоидом вращения, равномерно вращающимся вокруг оси симметрии. Орбита центра масс спутника является возмущенной из-за сжатия Земли вдоль оси вращения. Главный фокус «космического фотоаппарата» находится в центре масс спутника.



Построены графики координат вектора скорости движения изображения в фиксированной точке фокальной плоскости в зависимости от времени (истинной аномалии), поля скоростей. Проведен сравнительный анализ со случаем сферической модели Земли. В этом случае центр масс спутника описывает кеплеровскую эллиптическую орбиту.

Как правило, расчет поля скоростей в задачах по дистанционному зондированию Земли производится методами компьютерного моделирования. В данной работе получены в явном виде формулы для координат вектора скорости движения изображений в заданной точке фокальной плоскости.

**Ключевые слова:** *скорость движения изображений, фокальная плоскость, орбита, искусственный спутник Земли.*

## **The effect of Earth compression on the speed of image movement during optoelectronic surveying of the planet**

I.M. Nikulkina, A.V. Shatina

MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia

E-mail: shatina\_av@mail.ru

The purpose of the work is obtain formulas for calculating the speed of image movement in the focal plane during satellite imagery of the planet's surface using on-board optoelectronic equipment in nadir taking into account the compression of the Earth. The Earth is modeled by an absolutely solid homogeneous ellipsoid of revolution, uniformly rotating around the axis of symmetry. The orbit of the satellite's center of mass is perturbed due to the compression of the Earth along the axis of rotation. The main focus of the "space camera" is located in the center of mass of satellite. The graphs of the coordinates of the image velocity vector at a fixed point in the focal plane are plotted against time (true anomaly) and velocity field. A comparative analysis is carried out with the case of a spherical model of the Earth. In this case, the center of mass of the satellite describes a Keplerian elliptical orbit.

As a rule, the calculation of the velocity field in the tasks of remote sensing of the Earth is carried out by computer simulation methods. In this work, we explicitly obtained formulas for the coordinates of the image velocity vector at a given point in the focal plane.

**Keywords:** *image speed, focal plane, orbit, artificial Earth satellite.*

## Разделение движений колесного аппарата на «миксте»

А.П. Новодерова

МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия  
E-mail: an.novoderova@yandex.ru

Рассматривается начальная стадия движения двухосного четырехколесного аппарата при попадании одного из колес его ведущей оси на «микст» — участок опорной плоскости с меньшим коэффициентом трения. Ранее в [1] для случая, когда колеса аппарата (автомобиля) взаимодействуют с дорогой посредством увода, показано, что после быстрого выравнивания контактных сил он получает импульс угловой скорости, способный привести к заносу. С помощью методов разделения движений [2] получены оценки импульсов угловой скорости для этого и других вариантов взаимодействия колес с опорной плоскостью, включающих возможность их скольжения, и проведено сравнение полученных результатов. Показано, что учет моментов вращения колес слабо влияет на эти оценки, но важен при исследовании динамики корпуса аппарата на «миксте» после воздействия импульса угловой скорости.

**Ключевые слова:** микст, занос, разделение движений, увод, сухое трение.

### Литература

1. Новожиллов И.В., Павлов И.С., Фрольцов В.А. О поведении автомобиля на «миксте» // Механика твердого тела. 2001. № 3. С. 61–67.
2. Влахова А.В. Математические модели движения колесных аппаратов. Москва Ижевск: АНО, ИКИ «Ижевский институт компьютерных исследований», 2014. 148 с.

## Motions-separation of a wheeled vehicle on a “ $\mu$ -split road surface”

A.P. Novoderova

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
E-mail: an.novoderova@yandex.ru

The motion of the vehicle when the wheels of the driving axis enter a “ $\mu$ -split road surface” is considered. The term “ $\mu$ -split road surface” denotes the region of the reference plane with difference traction coefficients for the left and right wheels. Earlier in [1] wheels interact with the road through slip. And it was shown that after the rapid transition process of equalizing the contact forces on the wheels, the vehicle acquires an angu-

lar velocity capable of leading to skidding. Using the methods of fractional analysis we obtained its estimates of the angular velocity for various conditions of interaction of the wheels with the reference plane. It is shown that when constructing these estimates the rotation moments and aligning moments are small. A study is made of the further dynamics of the vehicle on the “ $\mu$ -split road surface”.

**Keywords:**  $\mu$ -split road surface, wheeled vehicle skidding, fractional analysis, slip model.

#### References

1. Novozhilov I.V., Pavlov I.S., Frolov V.A. On the behaviour of an automobile on a  $\mu$ -split road surface. *Mechanics of Solids*, 2001, no. 3, pp. 61–67.
2. Vlakhova A.V. *Mathematical Models of Wheeled Vehicles Movement*. Moscow–Izhevsk, 2014, 148 p. [in Russian].

## История вывода уравнения неразрывности Л. Эйлером, М.В. Остроградским и Н.Е. Жуковским

В.М. Овсянников

Московская государственная академия водного транспорта, Москва, Россия

E-mail: ovsyannikovvm@yandex.ru

Наиболее тщательные выводы дифференциального уравнения неразрывности для несжимаемой жидкости сделали Л. Эйлер (1752), М.В. Остроградский (1831), Н.Е. Жуковский (1876) [1–4]. Они использовали линейные по времени соотношения Коши—Гельмгольца и получили в дифференциальном уравнении члены второго и третьего порядка малости по времени. Наиболее полное уравнение неразрывности получил Эйлер. Это уравнение содержит якобианы второго и третьего порядков. И Эйлер, и Остроградский, и Жуковский уничтожили члены высокого порядка малости предельными переходами. Остроградский использовал также направляющие косинусы для уничтожения членов высокого порядка малости. Уничтожение членов высокого порядка малости стало некорректным после вывода Лайтхиллом в 1952–1954 гг. волнового уравнения [5]. Его метод использует взятие производной по времени от уравнения неразрывности. Члены второго порядка малости после взятия производной получают первый порядок и попадают в неоднородную часть волнового уравнения. Они генерируют автоколебания и звук при течении сжимаемой жидкости и газа.

**Ключевые слова:** уравнение неразрывности, волновое уравнение, автоколебания, генерация звука.

## Литература

1. Euler L. Principia motus fluidorum. Pars prior // Novi commentarii Academiae Imperialis scientiarum Petropolitanae, 1761. Vol. 6 (1756–1757). Pp. 271–311. Opera omnia, ser. II. V. 13. Pp. 1–369.
2. Эйлер Л. Принципы движения жидкостей. Перевод начальных разделов доклада 1752 г. в Берлинской АН / пер. с лат. Е.В. Ивановой, В.М. Овсянникова. 2-е изд., доп. Москва: Издательство «Спутник +», 2019. 178 с.
3. Ostrogradsky M.V. Note sur theorie de la chaleur. Memoires de l'Academie des sciences de St.-Petersburg, 1831. VI ser., sciences math., phys. et nat., vol. 1, pp. 129–138.
4. Кинематика жидкого тела Н.Е. Жуковского. Москва. ВЪ Университетской типографии (Катковъ). На Страстном бульваре, 1876. Математические диссертации, т. 5, 5.12.
5. Lighthill M.J. On sound generated aerodynamically. Part I. General theory. Part II. Turbulence a source sound // Proc. Roy. Soc., A211, 1952; A222, 1954.

## The history of the derivation of the continuity equation of L. Euler, M.V. Ostrogradsky and N.E. Zhukovsky

V.M. Ovsyannikov

Moscow State Academy of Water Transport, Moscow, Russia

E-mail: ovsyannikovvm@yandex.ru

The conclusions of the differential continuity equation for an incompressible fluid were made by L. Euler (1752), M.V. Ostrogradsky (1831), N.E. Zhukovsky (1876) [1–4]. They used time-linear Cauchy-Helmholtz relations and obtained terms of the second and third order of smallness in time in the differential continuity equation.

Euler got this continuity equation. This equation contains the Jacobians of the second and third orders. And Euler, and Ostrogradsky, and Zhukovsky destroyed the members of the high order of smallness by the limiting transitions. Ostrogradsky also used directional cosines to destroy members of the high order of smallness.

The destruction of the members of the high order of smallness became incorrect after the conclusion of Lighthill in 1952–1954 wave equation [5]. The Lighthill method uses the time derivative of the continuity equation.

Members of the second order of smallness after taking the derivative receive the first order and come to the inhomogeneous part of the wave equation. They generate self-oscillations and sound during the flow of compressible liquid and gas.

**Keywords:** continuity equation, wave equation, self-oscillations, sound generation.

## References

1. Euler L. Principia motus fluidorum. Pars prior. Novi commentarii Academiae Imperialis scientiarum Petropolitanae, 1761. Vol. 6 (1756–1757). Pp. 271–311. Opera omnia, ser. II. V. 13. P. 1–369.

2. Euler L. *Principles of fluid movement. Translation of the initial sections of the 1752 report in the Berlin Academy of Sciences*. Translated from Latin by E.V. Ivanova and V.M. Ovsyannikov. 2nd ed. Moscow, Sputnik + Publ., 2019, 178 p.
3. Ostrogradsky M.V. *Note sur theorie de la chaleur. Memoires de l'Academie des sciences de St.-Petersburg.*, 1831. VI ser., sciences math., phys. et nat., vol. 1, pp. 129–138.
4. Kinematics of a liquid body N.E. Zhukovskago. Moscow. In University printing house (Katkov). On Strastnoy Boulevard, 1876. Mathematical dissertations, vol. 5, 5.12.
5. *Lighthill M.J.* On sound generated aerodynamically. Part I. General theory. Part II. Turbulence a source sound. // Proc. Roy. Soc., A211, 1952; A222, 1954.

## **Использование линейных по времени формул Коши — Гельмгольца в выводах уравнения неразрывности Эйлера, Остроградского, Жуковского**

В.М. Овсянников<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московская государственная академия водного транспорта, Москва, Россия

<sup>2</sup>Ноябрьский институт нефти и газа — филиал ТИУ, Ноябрьск, Россия

E-mail: ovsyannikovvm@yandex.ru

Н.Е. Жуковский при построении эллипсоида деформации вычислил члены второго порядка малости уравнения неразрывности, но не использовал их в балансе вещества. Аналогичные члены высокого порядка малости найдены в работе Эйлера. Они проникают в волновое уравнение и генерируют волны давления. Формула Гаусса — Остроградского дает аналогичные члены, если интегралы заменить интегральными суммами и не использовать направляющие косинусы. Обсуждается использование членов высокого порядка малости в уравнениях электродинамики Максвелла. Высказана такая гипотеза: третье уравнение Максвелла для напряженности электрического поля может быть дополнено членами высокого порядка малости. Тогда оно даст волновое уравнение электродинамики третьего или четвертого порядка. Такие волновые уравнения дадут описание образования более сложных электромагнитных волн.

**Ключевые слова:** уравнение неразрывности, члены высокого порядка малости, волновое уравнение, электродинамика, уравнения Максвелла.

## Using time-linear Cauchy — Helmholtz formulas in the derivations of the continuity equation of Euler, Ostrogradsky, Zhukovsky

V.M. Ovsyannikov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Moscow State Academy of Water Transport, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Noyabrsk Institute of Oil and Gas — TIU branch, Noyabrsk, Russia

E-mail: ovsyannikovvm@yandex.ru

When constructing a strain ellipsoid, N.E. Zhukovsky calculated the second-order terms of smallness of the continuity equation. N.E. Zhukovsky did not use these terms in the balance of matter. Similar terms of a high order of smallness were found in Euler 1752. They penetrate the wave equation and generate pressure waves. The Gauss — Ostrogradsky formula gives similar terms if the integrals are replaced by integral sums and the direction cosines are not used. The use of high-order terms of smallness in Maxwell's electrodynamics equations is discussed. This hypothesis is expressed. The third Maxwell equation for electric field strength can be supplemented by members of a high order of smallness. It will give the differential wave equation of electrodynamics of the third or fourth order. Such wave equations will describe the formation of more complex electromagnetic waves.

**Keywords:** *continuity equation, high-order terms of smallness, wave equation, electrodynamics, Maxwell equations.*

## Возникновение вибраций при вращении жидкости

В.М. Овсянников<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Московская государственная академия водного транспорта, Москва, Россия

<sup>2</sup> Ноябрьский институт нефти и газа — филиал ТИУ, Ноябрьск, Россия

E-mail: ovsyannikovvm@yandex.ru

Расчеты показывают, что при круговом движении сжимаемой жидкости или газа обязаны возникать периодические колебания, сдвигающие ось вращения вещества в сторону от геометрического центра и накладывающиеся на стационарный режим вращения. Ранее эти автоколебания были получены за счет попадания в неоднородную часть волнового уравнения конвективных членов уравнения движения согласно результатам Ландау и Лифшица. В данной работе установлен вклад в интенсивность колебаний членов второго порядка малости уравнения неразрывности, вычисленных Эйлером в 1752 г. Интенсивность колебаний за счет обоих процессов оказалась пропорциональной квадрату якобиана поля скорости вращательного движения или четвертой степени угловой скорости вращения  $\omega$ .

Отличие двух процессов состоит в присутствии коэффициента 2 перед якобианом или 4 перед его квадратом во вкладе в интенсивность генерации волн конвективного члена уравнения движения.

Интенсивность генерации автоколебаний, вычисленная согласно полученным формулам, по порядку величины согласуется с наблюдаемыми явлениями в природе Земли и Солнца и в инженерных конструкциях.

**Ключевые слова:** уравнение неразрывности, члены высокого порядка малости, волновое уравнение.

### Литература

1. Euler L. Principia motus fluidorum. Pars prior // Novi commentarii Academiae Imperialis scientiarum Petropolitanae, 1761. Vol. 6 (1756–1757). Pp. 271–311. Opera omnia, ser. II. V. 13. Pp. 1–369.
2. Euler L. Commentationes Mechanicae ad theoriam corporum pertinentes. Volumen prius. Edidit C.A. Truesdell. Lausanne, 1954.
3. Эйлер Л. Принципы движения жидкостей. Перевод начальных разделов доклада 1752 г. в Берлинской АН / пер. с лат. Е.В. Ивановой и В.М. Овсянникова. 2-е изд., доп. Москва: Издательство «Спутник +», 2019. 178 с.

## The occurrence of vibrations during fluid rotation

V.M. Ovsyannikov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Moscow State Academy of Water Transport, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Noyabrsk Institute of Oil and Gas — TIU branch, Noyabrsk, Russia

E-mail: ovsyannikovvm@yandex.ru

During the circular motion of a compressible fluid or gas, periodic fluctuations must occur. Oscillations shift the axis of rotation from the geometric center and are superimposed on stationary rotation. Convective terms of the equation of motion fall into the inhomogeneous part of the wave equation and generate self-oscillations. This is obtained earlier according to the results of Landau and Lifshitz. In this paper, the contribution to the intensity of oscillations of the terms of the second order of smallness of the Euler's continuity equation 1752 is established.

The intensity of the generation of self-oscillations is consistent with the observed phenomena in the nature of the Earth and the Sun and in engineering structures.

**Keywords:** continuity equation, high-order terms of smallness, wave equation.

### References

1. Euler L. Principia motus fluidorum. Pars prior. *Novi commentarii Academiae Imperialis scientiarum Petropolitanae*, 1761. Vol. 6 (1756–1757). Pp. 271–311. Opera omnia, ser. II. V. 13, pp. 1–369.

2. Leonhardi Euleri. *Commentationes Mechanicae ad theoriam corporum pertinentes*. Volumen prius. Edidit C.A. Truesdell. Lausannae, 1954.
3. Euler L. *Principles of fluid movement. Translation of the initial sections of the 1752 report in the Berlin Academy of Sciences*. Translated from Latin by E.V. Ivanova and V.M. Ovsyannikov. 2nd ed. Moscow, Sputnik + Publ., 2019, 178 p.

## **Математические модели для разработки ядерных реакторов нового поколения**

В.С. Окунев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: okunevvs@bmstu.ru

К середине XXI столетия в России планируется переход к крупномасштабной ядерной энергетике. Это требует повышения роли внутренне присущих свойств в обеспечении безопасности АЭС. Отказ от приоритета активных (инженерных) систем аварийной защиты принципиально возможен для реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим охлаждением. Проектирование реакторов нового поколения требует развития единой методологии, основанной на системном подходе, исследовании операций, теории игр, вариационных методах, теории оптимального управления, логическом моделировании. Анализ безопасности следует проводить уже на стадии концептуальной разработки реактора. Основные требования к энергоисточникам будущего (экономическая эффективность, безопасность, обеспеченность топливом) можно формализовать в виде ограничений для соответствующих функционалов.

Автором рассматриваются некоторые прикладные задачи и методы их решения, имеющие разную степень формализации. Они объединены в три уровня, составляющие основу единой методологии принятия решений.

1. Методы теории оптимального управления, основанные на решении задач математического программирования в детерминистской постановке.

2. Методы теории принятия решений по многим критериям; методы решения задач в условиях неопределенности и неполноты исходной информации; элементы теории игр, включая формализованную часть теории конфликтов и критерии выбора рациональных решений в условиях неопределенности исходной информации.

3. Элементы неформализованной части теории конфликта, носящие описательный характер; анализ интуитивных понятий.

Выделены два основных направления исследований:

а) развитие соответствующих приложений исследования операций, использование элементов теории игр, разработка и развитие



оптимизационных моделей, включая построение моделей, алгоритмов теории принятия решений и непосредственно процедуру принятия решений, включая ее рационализацию;

б) развитие детерминистического подхода к анализу безопасности на основе разработанных приложений.

Разработано математическое обеспечение для проектирования быстрых реакторов нового поколения, позволившее не только получать оптимальные по заданным критериям компоновки реактора (включая условно равнобезопасные, т. е. Парето-оптимальные), но и выбрать предпочтительный состав материалов активной зоны. Так, для быстрого реактора наиболее предпочтительное топливо — смесь UN-PuN и нанопорошка металлического урана, теплоноситель — свинец ториевых руд, конструкционные материалы — коррозионно-стойкая сталь с вольфрамовым покрытием. Использование этих материалов в совокупности способствует исключению всех потенциально возможных тяжелых аварий на АЭС.

Важно, что при оптимизации состава свинца не требуется разделение изотопов.

Смоделированы все потенциально возможные аварийные ситуации, сопровождающиеся отказом аварийной защиты, а также их комбинации с учетом неодновременности начала. Исследования проведены в условиях неопределенности сценариев развития аварийных ситуаций. Функционалы, характеризующие аварийные режимы, включены в расчетно-оптимизационный программный комплекс.

## **Mathematical models for the development of new generation of the nuclear reactors**

V.S. Okunev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.  
E-mail: okunevvs@bmsu.ru

By the middle of the 21st century, Russia is planning a transition to large-scale nuclear power engineering. This requires increasing the role of intrinsic properties in ensuring the safety of nuclear power plants. The failure of the priority of active (engineering) emergency protection systems is fundamentally possible for fast neutron reactors with liquid metal cooling. Designing a new generation of reactors requires the development of a unified methodology based on a systems approach, operations research, game theory, variational methods, optimal control theory, and logical modeling. Safety analysis should be carried out at the conceptual design stage of the reactor. The main requirements for the energy sources of the future (economic efficiency, safety, fuel supply) can be formalized in the form of restrictions for the corresponding functionals.

The author considers some applied tasks and methods for their solution that have different degrees of formalization. They are combined in three levels that form the basis of a single decision-making methodology.

1. Methods of optimal control theory based on solving mathematical programming problems in a deterministic formulation;

2. Methods of decision theory according to many criteria; methods of solving problems in conditions of uncertainty and incompleteness of the initial information; elements of game theory, including the formalized part of the theory of conflict and criteria for selecting rational decisions in the conditions of uncertainty of the initial information;

3. Elements of the unformalized part of the theory of conflict, which are descriptive in nature; analysis of intuitive concepts.

There are two main areas of research.

(a) Development of appropriate applications for operations research, the use of elements of game theory, the development and development of optimization models, including the construction of models, decision theory algorithms and the decision-making procedure itself, including its rationalization;

(b) Development of a deterministic approach to security analysis based on the developed applications.

The software for designing fast reactors of a new generation was developed, which allowed not only to obtain optimal reactor designs according to specified criteria (including conditionally equipotential, i.e. Pareto-optimal), but also to choose the preferred composition of core materials. So, for the fast reactor, the most preferred fuel is a mixture of UN-PuN and nanopowder of metallic uranium, the coolant is lead of thorium ores, structural materials are corrosion-resistant steel with tungsten coating. The use of these materials together contributes to the elimination of all potential severe accidents at nuclear power plants.

It is important that the optimization of the composition of lead does not require the separation of isotopes.

All potential emergency situations, accompanied by a failure of emergency protection (anticipated transients without scram), as well as their combinations taking into account the non-simultaneous start, were simulated. The studies were carried out under conditions of uncertainty in emergency development scenarios. Functionals characterizing emergency conditions are included in the calculation and optimization software package.

## **Знакопеременная диссипация в задаче о торможении оперенного тела в сопротивляющейся среде**

Ю.М. Окунев, О.Г. Привалова, В.А. Самсонов

НИИ механики МГУ, Москва, Россия  
E-mail: [privalova@imec.msu.ru](mailto:privalova@imec.msu.ru), [samson@imec.msu.ru](mailto:samson@imec.msu.ru)

Исследуется процесс торможения динамически симметричного тела в невозмущенной атмосфере за счет установленного на нем оперения, что имеет важное прикладное значение. Находятся стационарные режимы торможения при движении центра масс тела вдоль оси симметрии. Показывается, что на характер устойчивости этих режимов влияют силы переменной диссипации, которые зависят от формы лопасти, углов их установки, расположения лопастей на теле и распределения масс тела. Определяются возможные режимы наименее и наиболее интенсивного торможения тел.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00538.*

**Ключевые слова:** оперенное тело, торможение, переменная диссипация.

## **Variable dissipation in the problem of deceleration of a finned body in resisting medium**

Yu.M. Okunev, O.G. Privalova, V.A. Samsonov

Institute of Mechanics of Lomonosov MSU, Moscow, Russia  
E-mail: [privalova@imec.msu.ru](mailto:privalova@imec.msu.ru), [samson@imec.msu.ru](mailto:samson@imec.msu.ru)

The process of deceleration of a dynamically symmetric finned body in an unperturbed atmosphere is studied. The problem of using fins for organizing of deceleration of the body is significantly important for applications. Stationary modes are found for which the center of mass of the body moves along the axis of symmetry of the body. It is shown that stability of such stationary modes is affected by forces of variable dissipation. These forces depend on the shape of the blades, pitch angles, location of the blades on the body and the distribution of masses. In particular, modes with the least and most intense deceleration are described.

*This work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 18-01-00538).*

**Keywords:** finned body, deceleration, variable dissipation.

## **Спуск оперенного тела с разным числом лопастей и с различными углами их установки в сопротивляющейся среде**

Ю.М. Окунев, О.Г. Привалова, В.А. Самсонов

НИИ механики МГУ, Москва, Россия  
E-mail: privalova@imec.msu.ru, samson@imec.msu.ru

Исследуется движение тяжелого оперенного тела на спуске в невозмущенной атмосфере. Оперение тела состоит из одинаковых лопастей. Изучается движение тела с четырьмя, тремя и двумя лопастями. В предыдущих работах были построены траектории центра масс тела в случае, когда лопасти установлены на одинаковые углы. Проводится сравнение с траекториями центра масс тела, у которого нарушена симметрия за счет установки одной или двух лопастей на угол, отличающийся от исходного. Находятся такие значения углов установки лопастей для асимметричного тела, при которых его центр масс движется по винтовой линии, у которой имеется «вторичный» винт с вертикальной осью. Показывается, что при определенном расположении лопастей на теле возможны режимы планирования. Находятся такие значения параметров асимметричного тела с четырьмя и тремя лопастями, при которых его центр масс совершает движение хаотического типа.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-08-01366).*

**Ключевые слова:** оперенное тело, угол установки лопасти, траектории центра масс тела.

## **The descent of the finned body with different number and pitch angles of blades in a resisting medium**

Yu.M. Okunev, O.G. Privalova, V.A. Samsonov

Institute of Mechanics of Lomonosov MSU, Moscow, Russia  
E-mail: privalova@imec.msu.ru, samson@imec.msu.ru

The descent of a heavy finned body in an unperturbed atmosphere is studied. Fins are represented by several (two, three or four) similar blades. For the case of equal pitch angles, trajectories of the center of mass of the body are constructed in previous works. This work studies how changing of the pitch angle of one of the blades affects motion of the center of mass of the body. Special values of pitch angles are found for which the center of mass moves along a spiral which has a "secondary" screw with a vertical axis. It is also shown that for a certain arrangement of the blades on the body, gliding modes are possible. Special values of parameters of

an asymmetric body (with three/four blades) are found for which the center of mass performs a chaotic kind motion.

*This work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 17-08-01366).*

**Keywords:** оперенное тело, угол установки лопасти, траектории центра масс тела.

## Программирование и моделирование перемещений роботизированной установки для прямого лазерного сплавления

М.А. Олейник, А.Н. Жидяев, А.И. Хаймович

Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

E-mail: oleynik1997@mail.ru, a.n.zhidyayev@gmail.com, berill\_samara@bk.ru

Технология прямого лазерного сплавления металлов и сплавов находит все более широкое применение при изготовлении малых и средних размеров деталей в аэрокосмической отрасли. Такая технология может быть реализована с помощью использования шестиосевого робота-манипулятора с двухосевым наклонно-поворотным столом (позиционером) для расширения технологических возможностей оборудования.

При таком количестве осей у робота одной из проблем является программирование сложной кинематики звеньев системы, поэтому на этапе подготовки производства важным шагом является моделирование (верифицирование) обработки. Моделирование позволяет визуализировать процесс обработки, отработать относительные движения узлов робота, исключить столкновения и сингулярности без задействования самого робота.

Движения элементов робота задаются только как повороты соответствующих звеньев, а не как линейные перемещения, как это происходит у обычных станков. Для этого разработан специальный постпроцессор, преобразующий команды в управляющей программе в требуемые движения узлов. Также используется созданная подпрограмма, выполняющая пересчет координат. Это связано в том, что движения робота имеют погрешности при обработке осесимметричных деталей, поэтому основным движением подачи становится вращение стола с заготовкой, а движения робота лишь корректируют траекторию.

Далее с помощью объемной кинематической модели робота производится процесс моделирования.

**Ключевые слова:** промышленный многоосевой робот, прямое лазерное сплавление, моделирование обработки.

## **Programming and modelling of robot movements for laser-based direct metal deposition**

M.A. Oleynik, A.N. Zhidyaev, A.I. Khaimovich

Samara National Research University, Samara, Russia  
E-mail: oleynik1997@mail.ru, a.n.zhidyaev@gmail.com, berill\_samara@bk.ru

The technology of laser direct metal deposition of metals and alloys is increasingly used in the manufacturing of small and medium sized parts in the aerospace industry. This technology can be implemented by using a six-axis robotic arm with a double-axis table (positioner) to expand the technological abilities of the equipment.

With such a number of axes, one of the problems is the creation of complex kinematics of robot's parts, therefore, at the stage of production preparation, an important step is the modeling (verification) of the process. Modeling allows to visualize the process of deposition, work out the relative movements, eliminate collisions and singularities without involving the robot itself.

The movements of the robot elements are specified only as the rotations of the parts, and not as linear movements, as is the case with conventional machines. For this, the special post-processor has been developed that converts the commands in the control program into the required joint movements. Also, the created subprogram is used that performs coordinate recalculating. This is due to the fact that the movements of the robot have errors when processing axisymmetric parts, so the main movement of the feed is the rotation of the table with the workpiece, and the movements of the robot only correct the trajectory.

Then, using the volumetric kinematic model of the robot, the simulation process is performed.

**Keywords:** *industrial multi-axis robot, laser direct metal deposition, process modeling.*

## **Колебания вращающейся жидкости, вытекающей из произвольного осесимметричного сосуда**

В.В. Орлов, А.Н. Темнов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: v\_orlov@list.ru, antt45@mail.ru

Работа посвящена анализу колебаний жидкости, частично или полностью заполняющей топливный бак, вращающийся вокруг продольной оси ракеты-носителя. Актуальность проблемы основана на необходимости оценки влияния внутрибаковых устройств (измери-

тельных, заборных, демпфирующих устройств) на колебания жидкого топлива. В настоящем сообщении приведена постановка задачи о движении несжимаемой вращающейся жидкости, вытекающей из осесимметричного бака произвольной формы через заборное устройство, и представлены решения задач о собственных колебаниях жидкости, с граничными условиями на свободной поверхности и поверхности с сопротивлением — поверхности слива заборного устройства. Решение проведено для сосудов произвольной формы методом конечных элементов.

При анализе полученных результатов следует отметить появление решений, не встречающихся в задачах без слива, а также изменение известных решений под влиянием вытекания жидкости. Наличие поверхности слива заборного устройства определяет возможность появления на ней дополнительных волновых движений — волн слива. Они характеризуются волновыми и собственными числами — решениями соответствующих систем уравнений с добавленным граничным условием на поверхности слива. Волны слива — это апериодические, затухающие волновые движения. Наличие в системе поверхности слива трансформирует незатухающие колебания — внутренние волны и волны на свободной поверхности — в затухающие волновые движения.

Применение метода конечных элементов на основе метода Галеркина позволило получить для сосуда произвольной осесимметричной формы решение задачи, особенность которой состоит в наличии граничного условия на поверхности слива. Разработан легко реализуемый вычислительный алгоритм для представления как на языках программирования низкого уровня, так и на вычислительных платформах типа Octavia, Mathcad или MATLAB. Благодаря этому можно получать решение для сосудов произвольной формы без использования зарубежных коммерческих специализированных продуктов типа Nastran и т. п.

**Ключевые слова:** жидкость, вращение, истечение, метод конечных элементов, заборное устройство.

## Литература

1. Колесников К.С. Динамика ракет. Москва: Машиностроение. 2003. 520 с.
2. Орлов В.В., Темнов А.Н. Нормальные колебания жидкости, вытекающей из вращающегося бака // Инженерный журнал: наука и инновации. 2019. Вып. 8. DOI: 10.18698/2308-6033-2019-8-1907

## Oscillations of a rotating fluid flowing from an arbitrary axisymmetric vessel

V.V. Orlov, A.N. Temnov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: v\_orlov@list.ru, antt45@mail.ru

The work is devoted to the analysis of fluid oscillations, partially or completely filling the fuel tank, rotating around the longitudinal axis of the launch vehicle. The relevance of the problem is based on the need to assess the effect of internal tank devices (measuring, intake, damping devices) on liquid fuel vibrations. This communication presents the statement of the problem of the motion of an incompressible rotating fluid flowing from an axisymmetric tank of arbitrary shape through a fluid release device, and presents solutions to the problems of natural oscillations of a liquid with boundary conditions on a free surface and a surface with resistance — the drain surface of the fluid release device. The solution was carried out for vessels of arbitrary shape by the Finite Element Method.

When analyzing the results obtained, it should be noted the appearance of solutions that are not encountered in problems without draining, as well as a change in known solutions under the influence of fluid outflow. The presence of the drain surface of the intake device determines the possibility of the appearance of additional wave motions on it — drain waves. They are characterized by wave and eigenvalues — solutions of the corresponding systems of equations with an added boundary condition on the drain surface. Drain waves are aperiodic, damped wave motions. The presence of a drain surface in the system transforms undamped vibrations — internal waves and waves on a free surface, into damped wave motions.

The application of the Finite Element Method based on the Galerkin method made it possible to obtain a solution of a problem for a vessel of arbitrary axisymmetric shape, the peculiarity of which is the presence of a boundary condition on the drain surface. An easily implemented computational algorithm has been developed for presentation both in low-level programming languages and on computing platforms such as Octavia, Mathcad or MATLAB. Due to this, it is possible to obtain a solution for vessels of arbitrary shape without the use of foreign commercial specialized products such as Nastran, etc.

**Keywords:** *fluid, rotation, outflow, finite element method, intake device.*

### References

1. Kolesnikov K.S. *Dynamics of rockets*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 520 p.
2. Orlov V.V., Temnov A.N. Normal vibrations of a fluid flowing from a rotating tank. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 8.  
DOI: 10.18698/2308-6033-2019-8-1907



## Уравнения состояния поликристаллических тел для численного решения задач механики сплошных сред

А.В. Острик

Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Россия  
E-mail: ostrik@icp.ac.ru

Уравнения состояния (УРС) требуются, прежде всего, для решения задач механики сплошных сред (МСС) численными методами. В достаточно общем случае их удобно представлять в виде зависимостей удельной внутренней энергии и давления от плотности и температуры. При построении УРС в таком виде возникает необходимость удовлетворения условию термодинамической совместности.

Для поликристаллических тел построение УРС облегчается их изотропией и возможностью применения теории теплоемкости Дебая. В то же время класс поликристаллических тел включает важные для практики конструкционные материалы (в частности, металлы и их сплавы), для которых накоплен представительный набор данных, требующихся при построении УРС.

При численном решении уравнений МСС (законов сохранения) они, как правило, замыкаются табличными широкодиапазонными полуэмпирическими УРС, что порождает ряд проблем. К основным из них относятся большие затраты машинного времени и нарушение условия термодинамической совместности при аппроксимации на двумерной сетке температур и плотностей.

Для разработки эффективных численных кодов требуются широкодиапазонные, но полуаналитические УРС, в которых нет необходимости в аппроксимации на двумерных сетках. Разработке упрощенных вариантов аналитических УРС для решения задач МСС посвящено значительное количество работ, в том числе и применительно к области ударного сжатия. В отличие от этих работ предлагается строить функции удельной холодной энергии и Грюнайзена при абсолютном нуле в зависимости от плотности в табличном виде (сетка — одномерная). Методам построения этих функций и УРС на их основе с учетом вклада электронной компоненты в удельную теплоемкость и посвящена настоящая работа.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 18-08-00964-а, № 18-08-00094-а).*

**Ключевые слова:** температурные уравнения состояния, холодное и тепловое давления, функция Грюнайзена, зависимость удельной теплоемкости от температуры, ударная адиабата.

## The equations of the state of polycrystalline bodies for the numerical solution of problems of continuous medium mechanics

A.V. Ostrik

Institute of Problems of Chemical Physics of the RAS, Chernigolovka, Russia  
E-mail: ostrik@icp.ac.ru

The equations of a state for polycrystalline bodies in compression are created on experimentally certain shock adiabatic curve and dependence of specific heat on density and temperature. These equations are very convenient for the numerical solution of problems of continuous medium mechanics.

The numerical method for definition of specific cold energy and the Grüneisen function at  $T = 0$  K depending on extent of substance compression is offered.

*Work was supported by the Russian Foundation of Basic Researches (No. 18-08-00094-a, 18-08-00964-a).*

**Keywords:** *temperature equations of state, cold and thermal pressure, Grüneisen function, dependence of specific heat capacity on temperature, shock adiabat.*

## Математическое моделирование процесса развития технологических напряжений в композитах, изготавливаемых путем многослойной нитевой навивки

Д.А. Паршин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИПМех РАН, лаборатория моделирования в механике деформируемого  
твёрдого тела, Москва, Россия

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: parshin@ipmnet.ru

Одним из преимуществ композитных изделий является потенциальная возможность целенаправленного формирования при их изготовлении контролируемых или даже заранее предписанных распределений технологических напряжений. Для этого, однако, требуется не только качественно понимать механизм развития этих напряжений в конкретном технологическом процессе, но и располагать адекватным количественным описанием этого механизма. Значительную долю применяемых методов изготовления материалов, элементов конструкций и деталей машин составляют разнообразные аддитивные технологии в широком смысле этого термина. При их применении изготавливаемые изделия постепенно изменяют свои размеры и фор-

му за счет последовательного присоединения к ним дополнительных слоев материала. Такой процесс формирования изделия протекает одновременно с процессом его деформирования под действием сопутствующих нагрузок и физических полей. На основе традиционных подходов механики деформируемого твердого тела проблематично более или менее адекватно описать подобные процессы деформирования ввиду их особой кинематики. Настоящее исследование опирается на подходы механики растущих деформируемых твердых тел, разрабатываемые в рамках отечественной научной школы, созданной известным ученым механиком и математиком, профессором А.В. Манжировым. В работе предложена неклассическая математическая модель процесса послойного изготовления цилиндрических композитных изделий путем многослойной навивки на вращающуюся основу погружаемой в затвердевающее связующее предварительно натягиваемой армирующей нити. Построены замкнутые аналитические зависимости, позволяющие проследить процесс развития полей технологических напряжений в получаемом изделии при различных законах изменения параметров моделируемого технологического процесса и выработать рекомендации по эффективному управлению распределениями этих напряжений. Полученные результаты обнаруживают не известные ранее эффекты и позволяют по-новому взглянуть на некоторые механические аспекты производства композитов.

*Работа выполнена по теме госзадания № АААА-А17-117021310381-8 и частично в рамках проектов РФФИ № 18-01-00770-а, 18-01-00920-а, 18-51-05012-Арм а, 19-51-60001-ЮАР\_т.*

**Ключевые слова:** *аддитивное производство, механика растущих тел, композиты, многослойная навивка, технологические напряжения, управление.*

## **Mathematical modeling of the process of technological stress development in composites manufactured by multilayer thread winding**

D.A. Parshin

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,  
Laboratory of Modeling in Solid Mechanics, Moscow, Russia  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: parshin@ipmnet.ru

One of the advantages of composite products is the potential possibility to purposefully generate in their manufacture controlled or even pre-described distributions of technological stresses. This, however, requires

not only a qualitative understanding of the mechanism of these stresses development in a particular technological process, but also an adequate quantitative description of this mechanism. A significant proportion of the methods used in manufacture of materials, structural elements and machine parts are a variety of additive technologies, in the broad sense of the term. When they are used, manufactured products gradually change their size and shape due to successive attachment of additional layers of material to them. This process of product formation occurs simultaneously with the process of its deformation under the action of accompanying loads and physical fields. On the basis of traditional approaches in solid mechanics it is problematic to describe more or less adequately similar deformation processes in view of their special kinematics. The present study is based on the approaches of mechanics of growing solids, being nowadays successfully developed within the framework of the Russian scientific school established by famous scientist Professor A.V. Manzhirov. The study proposes a non-classical mathematical model of the process of layer-by-layer manufacture of cylindrical composite products by multilayer winding on a rotating base pre-tensioned reinforcing thread immersed in a solidifying binder. The closed analytical dependences allowing to retrace the process of development of the technological stresses distributions in the obtained products at various laws of changing the relevant parameters of the modeled technological process are constructed. The dependences enable to give recommendations on these distributions efficacious control. The obtained results describe previously unknown effects and let one take a new look at some mechanical aspects of composites production.

*The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russia under State Assignment No. AAAA-A17-117021310381-8, and partially by the Russian Foundation for Basic Research under Projects No. 18-01-00770-a, 18-01-00920-a, 18-51-05012-Arm\_a, 19-51-60001-JuAR\_t.*

**Keywords:** *additive manufacturing, mechanics of growing solids, composites, multilayer winding, process stresses, control.*

## **К вопросу о соотношении гидродинамического демпфирования и снижения амплитуды колебаний за счет нелинейной жесткости механической системы**

А.И. Петухов, В.Ф. Смирнов, П.М. Шкапов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: a-i-petukhov@yandex.ru

Рассмотрена двухмассовая колебательная система. Исследован резонансный режим с гидродинамическим демпфированием. Представлена конструкция с нелинейной жесткостной характеристикой

и проанализирован срыв колебаний, приводящий к уменьшению их амплитуды. Проведен анализ экономии энергии по итогам полученных результатов.

**Ключевые слова:** двухмассовая система, нелинейные колебания, гидродинамическое демпфирование, срыв колебаний.

### **To the question of the ratio of hydrodynamic damping and a decrease in the amplitude of oscillations due to the nonlinear rigidity of a mechanical system**

A.I. Petukhov, V.F. Smirnov, P.M. Shkapov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: a-i-petukhov@yandex.ru

The double mass system is considered. The resonance mode with hydrodynamic damping is investigated. A design with a nonlinear stiffness characteristic is presented, and the jump phenomena of oscillation in the resonance mode is studied to reduce amplitude. The analysis of energy savings based on the results is obtained.

**Keywords:** double mass system, nonlinear oscillations, hydrodynamic damping, oscillation jump phenomena.

### **Методика исследования закритического поведения осесимметричных мембран**

С.А. Подкопаев, С.С. Гаврюшин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mails: sergey0511@mail.ru, gss@bmstu.ru

Рассмотрены теоретические основы нелинейного деформирования тонких осесимметричных оболочек. Представлены эксплуатационные характеристики мембран в различных коммутационных устройствах, клапанах и датчиках давления.

Рассмотрены типы нелинейного поведения закритического поведения мембран. Представлены математическая модель для описания процесса нелинейного деформирования осесимметричных оболочек, метод дискретного продолжения по параметру и прием «смены подпространства управляющих параметров».

На примере шарнирно-опертой сферической оболочки выполнено исследование закритического поведения.

Выбрана рациональная математическая модель для описания нелинейного деформирования хлопающих симметричных оболочек.

Разработан и реализован в виде авторской программы численный алгоритм исследования процессов нелинейного деформирования многопараметрических систем.

**Ключевые слова:** нелинейное деформирование, тонкостенная осесимметричная оболочка, мембрана, закритическое поведение, дискретное переключение, продолжение по параметру, смена подпространства параметров.

## Methods for studying the post-buckling behavior of axisymmetric membrane

S.A. Podkopaev, S.S. Gavrushin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mails: sergey0511@mail.ru, gss@bmstu.ru

The theoretical foundations of nonlinear straining of thin-walled axisymmetric shells are considered. The operational characteristics of the membranes in various switching devices, valves and pressure sensors are presented.

The types of non-linear behavior of post-buckling behavior of axisymmetric membranes are considered. A mathematical model is presented to describe nonlinear straining of axisymmetric membranes, a discrete continuation by parameter method, and the “changing the subspace of control parameters” technique.

Using the hinged spherical shell as an example, a study of post-buckling behavior is performed.

A rational mathematical model has been selected to describe nonlinear straining of thin-walled axisymmetric shells.

A numerical algorithm for studying the processes of nonlinear straining of multi-parameter systems has been developed and implemented as an author program.

**Keywords:** nonlinear straining, thin-walled axisymmetric shell, membrane, post-buckling behavior, discrete switching, continuation by parameter, change of the subspace of parameters.

**Механические аналогии и колебания бака с жидкостью  
(к 100-летию академика РАН К.С. Колесникова)**

А.А. Пожалостин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: fn3@bmstu.ru

Среди ученых, которые использовали модель механического аналога в виде математического маятника (линейного осциллятора) в 1960-е годы, был академик РАН Константин Сергеевич Колесников, применивший метод для учета подвижности жидкости в топливных баках ракет. В докладе показано применение подхода, связанного с понятием механического аналога к задаче об ударе прямоугольного бака с жидкостью о неподвижную опору. Эта задача имеет практическое применение (в судоходстве) в настоящее время при движении судов нефте- и газозовов по Северному морскому пути в случае столкновения с ледяной преградой (торосами).

**Mechanical analog and vibrations tank with liquid  
(to the 100th anniversary of RAN academician  
K.S. Kolesnikov)**

A.A. Pozhalostin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: fn3@bmstu.ru

Among the scientists who used the mechanical analog (MA) model in the form of the mathematical pendulum (linear oscillation) in 1960th there was RAN academician Konstantin Sergeevich Kolesnikov. The report illustrates the use of the approach related to the concept of mechanical analog to the task about the impact of a rectangular tank filled with liquid on a motionless support. This task has practical application (in shipping) presently when moving oil and gas carriers on the Northern sea route in the event of a collision with an ice barrier (ice drifts).

## Нечеткая регрессионная модель на основе исходной $Z$ -информации

О.М. Полещук

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: olga.m.pol@yandex.ru

В статье разработана регрессионная модель, входными и выходными данными которой являются  $Z$ -числа.  $Z$ -числом называется упорядоченная пара нечетких чисел. Первое число является нечетким расширением значений некоторой действительной переменной, а второе число является нечетким расширением меры надежности (достоверности) первого числа. Построение регрессионных моделей в условиях исходной  $Z$ -информации (информации с данными в виде  $Z$ -чисел) является актуальной задачей. Однако на данный момент существует единственная регрессионная модель, построение которой осуществляется на основе оперирования с нечеткими числами и вероятностными распределениями с последующим использованием меры Джаккарта. О недостатках подобного оперирования в условиях незнания точных значений вероятностных распределений говорилось неоднократно, поэтому актуальной является проблема дальнейшей разработки регрессионного анализа в условиях  $Z$ -информации. В работе обе компоненты  $Z$ -чисел являются термами лингвистических переменных, обладающих свойствами полноты и ортогональности. Оперирование с  $Z$ -числами происходит не на основе классической нечеткой арифметики, а на основе взвешенной нечеткой арифметики, что существенно упрощает вычислительные процедуры, не требует точного знания вероятностных распределений и не теряет информационную особенность исходной информации.

**Ключевые слова:** нечеткая регрессионная модель,  $Z$ -число, лингвистическая переменная.

## A fuzzy regression model for initial $Z$ -information

O.M. Poleshchuk

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: olga.m.pol@yandex.ru

A regression model, the input and output data of which are  $Z$ -numbers, is developed in the paper. A  $Z$ -number is an ordered pair of fuzzy numbers. The first number plays a role of a fuzzy constraint on values that some real variable may take, and the second number plays a role of a fuzzy constraint on the reliability measure of the first number. The construction of regression models under initial  $Z$ -information (infor-



mation with data in the form of Z-numbers) is an actual task. However, at the moment there is only one regression model, the construction of which is carried out on the basis of operations with fuzzy numbers and probability distributions, followed by the use of the Jakkart measure. The disadvantages of such an operation under conditions of ignorance of the exact values of the probability distributions have been repeatedly mentioned, therefore, the urgent problem is the further development of regression analysis in the conditions of Z-information. In the work, both components of Z-numbers are terms of linguistic variables with the properties of completeness and orthogonality. Z-numbers are operated not on the basis of classical fuzzy arithmetic, but on the basis of weighted fuzzy arithmetic, which greatly simplifies computational procedures, does not require accurate knowledge of probability distributions, and does not lose the informational feature of the initial information.

**Keywords:** *fuzzy regression model, Z-number, linguistic variable.*

## **Вероятностное прогнозирование оценок вибрационного состояния оборудования**

Е.А. Правоторова<sup>1</sup>, О.Б. Скворцов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИМАШ РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>НТЦ «Балансмаш», Москва, Россия

E-mail: pravotorova@bk.ru, skv@balansmash.ru

Рассмотрены вопросы применения вибрационного мониторинга для прогнозирования состояния сложного технического оборудования в условиях длительной эксплуатации. Предложены методики прогнозирования в условиях немонотонного поведения трендов трендов параметров и использования локальной эргодичности статистических параметров оценок вибрации.

**Ключевые слова:** *вибрация, диагностика, прогнозирование, вероятность, достоверность, эргодичность, мониторинг.*

## **Probabilistic forecasting of the estimates of the vibration condition of the equipment**

Е.А. Pravotorova<sup>1</sup>, О.В. Skvorcov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>IMASH RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>STC “Zavod Balansirovochnykh mashin”, Moscow, Russia

E-mail: pravotorova@bk.ru, skv@balansmash.ru

The issues of the use of vibration monitoring to predict the state of complex technical equipment in long-term operation are considered. Methods of forecasting under conditions of non-monotonous behavior of

trends of parameter trends and using local ergodicity of statistical parameters of vibration estimates are proposed.

**Keywords:** *vibration, diagnostics, prognostic, probability, reliability, ergodicity, monitoring.*

## **Анализ динамики зубчатой передачи с эллиптическими колесами в составе привода перемешивающего устройства**

А.А. Приходько

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия  
E-mail: sannic92@gmail.com

Работа посвящена исследованию динамики перемешивающего устройства с неравномерным движением рабочего органа, в качестве исполнительного механизма которого применена передача эллиптическими зубчатыми колесами. Динамическая модель построена путем приведения сил, масс и моментов к начальному звену (входному валу исполнительного механизма). Исследование полученного нелинейного уравнения движения проведено методом энергомасс. В результате анализа найден закон движения начального звена. Так как при данном законе не обеспечивается допустимый коэффициент неравномерности движения, то проведен расчет маховика, необходимого для достижения требуемой равномерности вращения входного вала. Полученная математическая модель может быть использована при создании и проектировании перемешивающих устройств.

**Ключевые слова:** *вращательное движение, неравномерное движение, эллиптические зубчатые колеса, динамический анализ, приведенный момент инерции, приведенный момент сил сопротивления.*

## **Dynamic analysis of elliptical gear in the drive system of stirred tank**

A.A. Prikhodko

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia  
E-mail: sannic92@gmail.com

The work is devoted to the study of the dynamics of a stirred tank with irregular movement of the impeller, in which transmission by elliptical gears is used as an actuator. The dynamic model is built by bringing forces, masses and moments to the initial link (input shaft of the actuator). The study of the obtained nonlinear equation of motion was carried out by

the energy-mass method. As a result of the analysis, the law of motion of the initial link was found. Since with this law the permissible coefficient of unevenness of movement is not provided, the flywheel is calculated, which is necessary to achieve the required uniformity of rotation of the input shaft. The resulting mathematical model can be used to create and design stirred tanks.

**Keywords:** *rotational motion, irregular motion, elliptical gearwheels, dynamic analysis, reduced moment of inertia, reduced moment of resistance forces.*

## Решение нелинейной задачи динамики сплошной среды в рамках школьной программы по физике

П.Г. Русанов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: parus@bmstu.ru

Методом твердых тел (МТТ) исследованы колебания нелинейной консервативной системы тел — «сжимаемый газ под поршнем», находящихся внутри неподвижного цилиндра с вертикальной продольной осью. Ее эквивалентная расчетная схема, представленная поршнем и одной молекулой газа в виде материальной точки, имеет две степени свободы. Начальный запас кинетической энергии позволяет молекуле непрерывно двигаться вертикально вверх и вниз между подвижным поршнем и дном цилиндра. Вне моментов соударений тела движутся независимо в однородном поле силы тяжести с постоянным ускорением  $g$ , меняя во времени  $t$  свою высоту по закону параболы, а скорость — по линейному закону. При ударе положения тел не меняются, но происходит мгновенное обновление величин их скоростей в соответствии с законами сохранения количества движения и кинетической энергии. Поэтому математическая модель (ММ) для расчета переменных высот и скоростей тел является алгебраической.

При известных начальных условиях алгоритм решения задачи сводится к циклически повторяемому расчету корней двух квадратных уравнений, по которым определяются новые начальные условия для последующих фаз свободного движения тел, т. е. момент и координата места очередного столкновения тел, а также их новые скорости после удара.

При высокой средней скорости движения молекулы между поршнем и дном цилиндра количество ее соударений с препятствиями за 1 с превышает 200 раз. Поэтому, чтобы выяснить общую картину движения поршня на протяжении многих секунд, следует пору-

читать эти элементарные, но многочисленные вычисления роботу в виде компьютера. С его помощью первично получены графики изменения высоты положения поршня  $H = f(t)$  и проекции его скорости  $\dot{H} = \varphi(t)$ . По ним произведены количественные оценки высоты равновесного положения поршня, амплитуды и периода  $\tau$  его низкочастотных колебаний и даже по формуле МКТ текущей величины давления «газа» по кинетической энергии молекулы. Явная асимметрия формы построенной замкнутой кривой фазовой характеристики  $F[f(t), \varphi(t)] = 0$  подтвердила принципиальное отличие периодических колебаний поршня от гармонических.

Величина периода  $\tau$  была протестирована по решению нелинейного дифференциального уравнения движения поршня, в котором учитывалось влияние положения поршня на текущую величину давления газа при изотермических условиях. В новой ситуации период малых колебаний поршня оказался в  $k \approx 1,73$  раз больше, чем период  $\tau$ . С позиций МКТ причиной несовпадения периодов стала чрезмерная экономия на числе вводимых степеней свободы для молекулы. На самом деле она была наделена всего лишь одной степенью свободы вместо полагающихся ей трех степеней по трем независимым направлениям. В идеале тестовое значение  $k$  должно было равняться  $k = \sqrt{3}$ .

Цель сообщения — пробудить интерес кафедр к включению в учебные программы вузов разделов, направленных на обучение студентов методу МТТ, который был разработан автором на кафедре теоретической механики МГТУ им. Н.Э. Баумана при поддержке со стороны акад. К.С. Колесникова. Высокая «производственная» эффективность МТТ обусловлена рядом его замечательных качеств. Среди них: 1) все формы механического состояния вещества; 2) конструктивный способ выделения и исключения быстрых переменных из списка обобщенных координат; 3) наследуемые физические модели массовых сил плюс новые физические модели для структурированных материалов; 4) те же технологии автоматизированного вывода ММ, которые применяют в отношении систем абсолютно твердых тел; 5) итоговые ММ принадлежат к числу нежестких систем ОДУ или к алгебраическим системам; 6) очевидность физического смысла членов ММ; 7) более высокая точность получаемых результатов по сравнению с другими методами при его соотношении к общему числу введенных медленных переменных; 8) быстрое практическое освоение студентами младших курсов ключевых приемов формирования ММ на основе этого метода.

## **Solving the nonlinear problem of continuum dynamics in the framework of school program in Physics**

P.G. Rusanov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: parus@bmstu.ru

The oscillations of a nonlinear conservative system of bodies "compressible gas under the piston" inside a stationary cylinder with a vertical longitudinal axis are investigated by the Solid Bodies Method (SBM). It is equivalent to the calculation scheme submitted by the piston and one molecule of gas, as a particle, has two degrees of freedom. The initial supply of kinetic energy allows the molecule to continuously move vertically up and down between the movable piston and the bottom of the cylinder. Outside the moments of collisions, bodies move independently in the homogeneous gravity field with constant acceleration  $g$ , changing in time  $t$  their height according to the parabola law, and the speed according to the linear law. On impact, the positions of bodies do not change, but there is an instantaneous update of the values of their velocities in accordance with the laws of conservation of the amount of motion and kinetic energy. Therefore, the mathematical model (MM) for calculating the variable heights and velocities of bodies is algebraic.

Under known initial conditions, the algorithm for solving the problem is reduced to a cyclically repeated calculation of the two quadratic equations roots, which determine the new initial conditions for the subsequent phases of free motion of bodies, that is the moment  $t$  and coordinate of the place of the next collision of bodies, as well as their new velocities after impact.

With a high average speed of the molecule between the piston and the bottom of the cylinder, the number of collisions with obstacles for 1 second exceeds 200 times. Therefore, in order to find out the General picture of the movement of the piston for many seconds, you should entrust these elementary but numerous calculations to a robot in the form of a computer. With its help, graphs of the change in the height of the piston position  $H = f(t)$  and the projection of its speed  $\dot{H} = \varphi(t)$  are obtained. According to them, there were obtained quantitative estimates of the height of the equilibrium position of the piston, the amplitude and period  $\tau$  of its low-frequency oscillations, and even by the formula MKT the current value of the "gas" pressure on the molecule kinetic energy. The apparent asymmetry of the shape of the constructed closed curve of the phase characteristic confirmed the fundamental difference between periodic oscillations of the piston and harmonic ones.

The value of the period  $\tau$  was tested by solving a nonlinear differential equation of piston motion, which took into account the effect of the piston

position on the current value of the gas pressure under isothermal conditions. In the new situation, the period of small oscillations of the piston was  $k \approx 1.73$  times greater than the period  $\tau$ . From the standpoint of MKT, the reason for the mismatch of periods was excessive savings on the number of degrees of freedom introduced for the molecule. In fact, it was endowed with only one degree of freedom instead of the three degrees it was entitled to in three independent directions. Ideally, the test value of  $k$  should be equal to  $k = \sqrt{3}$ .

The purpose of the message is to awaken to awaken interest of departments to inclusion in educational programs of training in the SBM method, developed by the author at the Department of Theoretical mechanics of Bauman MSTU with the support of academician K. S. Kolesnikov. High "production" efficiency of SBM is caused by a number of its remarkable qualities. Among them: (1) all forms of the mechanical state of matter; (2) a constructive way to select and exclude fast variables from the list of generalized coordinates; (3) inheritance of physical models of mass forces plus the new physical models for structured materials; (4) the same technologies of automated output MM as apply in relation to systems of absolutely solid bodies; (5) the resulting MM belong to the number of non-rigid ODE or to algebraic systems; (6) evidence of the physical meaning of the MM members; (7) higher precision of the obtained results, in comparison with other methods, if it is correlated to the total number of introduced slow variables; (8) the rapid practical mastering of the keys techniques of MM formation based on this method by University students of engineering specialties, starting from 2 years of study.

**Проблема чувствительности крупногабаритных  
прецизионных космических конструкций  
из высокомодульных волокнистых полимерных  
композиционных материалов (ВПКМ)  
к микродинамическим воздействиям**

С.Н. Саяпин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup>ИМАШ РАН, Москва, Россия

E-mail: S.Sayarin@rambler.ru

Рассмотрена проблема микродинамической чувствительности прецизионных крупногабаритных космических конструкций (ПКГКК) из высокомодульных ВПКМ, связанная со скачкообразным увеличением модуля упругости материала при прохождении порога малых напряжений. Представлены экспериментальные данные испытаний

на сжатие трубчатых образцов-свидетелей из углепластика КМУ-4Л, на которых установлено скачкообразное увеличение модуля (7,375 ГПа и 158 ГПа) при прохождении порога малых напряжений (от 0 до 5 кН). Показано, что погрешность систем обезвешивания ПКГКК при наземной отработке приводит к остаточным нагрузкам на их формообразующие элементы, превышающим пороговые значения малых нагружений. В результате при малых нагружениях в условиях орбитального полета расчетные значения модуля упругости ПКГКК из высокомодульных ВПКМ могут оказаться выше реальных более чем в 20 раз. Таким образом, при использовании высокомодульных ВПКМ в ПКГКК, например, параболических зеркалах из углепластика диаметром 10 и более метров с точностью рабочей поверхности не хуже 10 мкм, необходимо учитывать их чувствительность к микродинамическим воздействиям в условиях полета. Показаны возможные пути решения проблемы.

**Ключевые слова:** микродинамическая чувствительность, прецизионные КГКК, высокомодульные ВПКМ.

## **Problem of sensitivity of large-size precision space structures from high-modulus fibrous polymer composite materials to microdynamical influences**

S.N. Sayapin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Moscow, Russia

E-mail: S.Sayapin@rambler.ru

The causes of the problem of microgravity and inertial sensitivity of large-size precision space structures (LSPSS) from high-modulus fibrous polymer composite materials (HMFPCM) associated with an abrupt increase in the elastic modulus of the material when overcoming the threshold values of low stresses are considered. For example, the elastic modulus of tubular samples from high-modulus fibrous polymer composite materials with the longitudinal carbon fibers at the first (from 0 to 5 kN) and subsequent loading sites were 7,375 GPa and 158 GPa, respectively. As a result, under low loads arising in orbital flight, the calculated values of the elastic modulus of LSPSS can be higher than the real ones by more than 20 times and the real elastic deformation such structures can be higher than the calculated ones. Thus, when using HMFPCM in LSPSS it is necessary to take into account their microgravity and inertial sensitivity in orbital flight. Possible ways of solving the problem are shown.

**Keywords:** microdynamics sensitivity, large-size precision space structures, high-modulus fibrous polymer composite materials.

## **Бесконтактный online-метод контроля натяжения сетеполотна радиоотражающей поверхности складной крупногабаритной зеркальной антенны**

С.Н. Саяпин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup>ИМАШ РАН, Москва, Россия

E-mail: S.Sayapin@rambler.ru

Представлен новый бесконтактный онлайн-метод контроля натяжения сетеполотна радиоотражающей поверхности складной крупногабаритной антенны. Метод основан на выявленной связи муаровых картин с равномерностью и усилием натяжения сетеполотна. Показаны преимущества описанного метода, основным из которых является возможность установки сетеполотна на складном каркасе зеркала антенны в режиме online. Представленный метод универсален и может быть использован не только для изготовления антенных отражателей с рабочей поверхностью в виде сетчатой завесы, но и в любых других конструкциях, в которых проверяемый элемент является сеткой независимо от материала, из которого он изготовлен. Показан пример практического применения метода.

**Ключевые слова:** складные зеркальные антенны, контроль натяжения сетеполотна, муаровые картины.

## **Contactless online method for checking-up a net-shaped curtain's tension of a reflecting surface of folding large-size mirror antenna**

S.N. Sayapin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Moscow, Russia

E-mail: S.Sayapin@rambler.ru

A new contactless method for checking-up a net-shaped curtain's tension of a radio-reflective surface of a large umbrella reflector antenna is presented. The method is based on revealing the correlation between Moire patterns and net-shaped curtain uniformity and tension. The advantages of the method are presented. Its main advantage lies in the fact that it is possible to set the net-shaped curtain on the folding skeleton of an antenna reflector in the online mode. The presented method is universal and can be used not only to manufacture antenna reflectors with the working surface in the form of a net-shaped curtain but also in any other structures in which the checked element is a net, regardless of the material of which it is made. A way to apply the method is presented.

**Keywords:** folding large-size mirror antenna, checking-up of tension of net-shaped surface, moire patterns.



## Молекулярный поток идеального равновесного газа через малое отверстие в вакуум

А.В. Семиколонов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: avsemik@bmstu.ru, avsemik@mail.ru

В работе рассматривается истечение идеального равновесного газа из большого сосуда через канал малого отверстия в вакуум. Истечение газа рассматривается как молекулярное течение в микроканале. Предполагается, что расход газа очень мал, поэтому состояние основной массы в сосуде газа практически не меняется и остается равновесным. Целью исследования является определение параметров газа внутри канала отверстия.

Исходя из известной функции распределения молекул, попадающих внутрь отверстия за некоторый малый промежуток времени, можно определить долю вылетевших через отверстие молекул, а также долю унесенной этими молекулами энергии. Это позволяет построить искомые функции, описывающие зависимости количества молекул внутри отверстия и их суммарной энергии от времени.

Данный подход к описанию истечения равновесного газа через малое отверстие отличается от большинства современных исследований прямым применением функции распределения по скоростям молекул, попавших в отверстие. Это позволяет описывать процесс заполнения канала малого отверстия молекулами газа без привлечения гипотезы сплошной среды.

**Ключевые слова:** молекулярный поток, идеальный газ, истечение, вакуум, распределение молекул.

## The molecular flow of an ideal equilibrium gas through a small hole in a vacuum

A.V. Semikolenov

Bauman Moscow Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: avsemik@bmstu.ru, avsemik@mail.ru

The paper deals with the flow of the ideal equilibrium gas from a large vessel through the channel of small hole into the vacuum. The gas flow is considered as a molecular flow in the microchannel.

It is assumed that the gas flow rate is very small; therefore, the state of the gas in vessel practically does not change and is a equilibrium one. The aim of the study is to determine the parameters of the gas inside the channel of the hole.

Based on the known distribution function of the molecules entering the hole over a short period, it is possible to determine the fraction of molecules emitted through the hole, as well as the fraction of energy carried away by these molecules. This allows you to build the desired functions that describe the dependence of the number of molecules inside the channel of hole and their total energy on time.

This approach to describing the outflow of equilibrium gas through a small hole differs from most modern studies by the direct application of the velocity distribution function of the molecules hit in the hole. This allows us to describe the process of filling the channel of small hole with gas molecules without invoking the hypothesis of a continuous medium.

**Keywords:** *molecular flow, ideal gas, outflow, vacuum, distribution of molecules.*

## Численный расчет эффекта Джанибекова

М.Н. Сергеев

РГАТУ им. П.А. Соловьева, Рыбинск, Россия  
E-mail: mihail\_sergeev@mail.ru

Исследование вращательного движения сплошной среды представляет интерес как чисто научный, так и практический. Для понимания сложных движений механических систем необходимо исследование таких моделей, как волчок Эйлера. При определенных соотношениях между главными моментами инерции твердого тела возникают периодические повороты оси вращения тела на  $180^\circ$ . Такое движение называется эффектом Джанибекова. Физическая природа этого явления описывается на основе уравнений Эйлера и законов сохранения энергии и момента импульса [1]. Приближенное аналитическое исследование эффекта Джанибекова дано в работе [2]. Прямое численное решение данной задачи обладает тем преимуществом, что снимает ограничения, необходимые для реализации аналитического подхода. Численный расчет хорошо согласуется с аналитическими результатами.

**Ключевые слова:** *момент импульса, момент инерции, угловая скорость.*

### Литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учеб. пособие: в 10 т. Т. 1: Механика. 4-е изд., испр. Москва: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 216 с.
2. Петров А.Г., Володин С.Е. «Эффект Джанибекова» и законы механики // Доклады АН. 2013. Т. 451, № 4. С. 399–403.

## Numerical calculation of the Janibekov effect

M.N. Sergeyev

Soloviev RSATU, Rybinsk, Russia  
E-mail: mihail\_sergeev@mail.ru

The study of the rotational motion of a continuous medium is of interest both purely scientific and practical. To understand the complex motion of mechanical systems, it is necessary to study models such as the Euler top. At certain ratios between the main moments of inertia of a rigid body there are periodic rotations of the axis of rotation of the body by 180 degrees. This movement is called the Janibekov effect. The physical nature of this phenomenon is described on the basis of Euler equations and the laws of conservation of energy and momentum [1]. An approximate analytical study of the Janibekov effect is given in [2]. The direct numerical solution of this problem has the advantage that it removes the constraints necessary for the implementation of the analytical approach. The numerical calculation showed good agreement with the analytical results.

**Keywords:** *moment of momentum, moment of inertia, angular velocity.*

### References

1. Landau L.D., Lifshits E.M. *Theoretical physics*. In 10 vols. Vol. 1: Mechanics. 4th ed., rev. Moscow, Nauka Publ., 1988, 216 p.
2. Petrov A.G., Volodin S.E. "The Janibekov Effect" and the laws of mechanics. *Reports of the Academy of Sciences*, 2013, vol. 451, no. 4, pp. 399–403.

## Метод оценки надежности системы отделения космического аппарата от маршевого двигателя

Н.И. Сидняев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: Sidnyaev@bmstu.ru

Системы разделения отличаются большим разнообразием, так как отделение пассивных элементов конструкции возможно на всех участках полета космического аппарата (КА): на активном участке траектории, при полете по орбите искусственного спутника Земли (ИСЗ) или к другим телам Солнечной системы, при посадке на них, при полете по траектории возврата, а также на участке спуска на поверхность Земли. Процесс разделения условно делится на непосредственно разделение (разрыв силовых связей между элементами конструкции КА) и отделение (относительное движение разделившихся тел). Требования по надежности к системе отделения в общем случае

есть совокупность количественных и (или) качественных требований к безотказности, долговечности и сохраняемости [1]. Задачей исследования надежности является создание устройства разделения частей ракеты с достижением технического результата в виде повышения надежности устройства разделения частей ракеты за счет создания конструкции стыковочных элементов, которые должны разрушаться при отказе одного из пироэлементов при штатном срабатывании остальных. Эта задача решается таким образом, что в устройстве разделения частей ракеты, содержащем стыковочные фитинги отделяемых частей ракеты, расположены по плоскости стыка, пироэлементы и средства разведения разделяемых частей, причем по крайней мере одна из полок каждой стыковочной пары выполнена с ослаблением, обеспечивающим ее механическое разрушение при защемлении данного фитинга от разворота разделяемых частей относительно отказавшего пироэлемента. В устройстве разделения ступеней ракеты фитинги выполнены с увеличенным по сравнению с конструктивным при нормальном срабатывании пироэлементов плечом защемления от линии разворота стыка до оси пироэлемента. При отказе одного из пироэлементов ослабленные части стыка разрушаются, освобождая связь между разделяемыми частями ракеты. Средства увода разводят части ракеты друг от друга. Однако при этом возникает момент, «защемляющий» единичный элемент стыка из-за разворота разделяющихся частей ракеты (ступеней ракеты или отделяемой полезной нагрузки) относительно отказавшего пироэлемента и, как следствие, появляется дополнительное нагружение элементов стыка. При нормальной, безотказной работе устройства разделения пироэлементы нагружаются только продольными растягивающими и срезающими усилиями от нагрузок, возникающих при эксплуатации ракеты на Земле и в полете. Запас прочности при этом существенно выше. При защемлении же стыка элементы стыка дополнительно нагружаются моментом и силой по оси пироэлемента существенно более высокой, чем усилие на узел разделения при нормальном, безотказном нагружении.

**Ключевые слова:** *оценка надежности, безопасность, испытание, функционирование, статистика.*

### **Литература**

1. Сидняев Н.И., Макриденко Л.А., Геча В.Я., Онуфриев В.В., Говор С.А. Определение высотных характеристик электрических ракетных двигателей космического аппарата методами планирования эксперимента // Проблемы управления. 2017. № 1. С. 75–85.

## **A method for assessing the reliability of the spacecraft separation system from the main engine**

N.I. Sidnyaev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: Sidnyaev@bmstu.ru

Separation systems are very diverse, as the Department of passive design elements can be used for all phases of flight of a spacecraft (SC): actinomyete trajectory during the flight in orbit of artificial Earth satellite (AES) or other bodies of the Solar system by landing on them, when flying along the trajectory of return, and a descent phase to the surface of the Earth. The separation process is conventionally divided into direct separation (rupture of force bonds between the structural elements of the spacecraft and separation (relative motion of separated bodies. Reliability requirements for the separation system in General are a set of quantitative and (or) qualitative requirements for reliability, durability and preservation [1]. The task of the reliability study is to create a device for separating rocket parts with the achievement of a technical result in the form of increasing the reliability of the device for separating rocket parts by creating a design of docking elements that must be destroyed when one of the pyroelectric elements fails when the others are normally triggered. This task is solved in such a way that in the device separation parts of the rocket containing the connecting fittings detachable parts of the rocket, located at the plane of the junction, pyroelement and means of cultivation of shared parts from each other, and at least one of the shelves of each mating pair is made with weakening, allowing its mechanical destruction due to jamming of the fitting from turning relative to the separable parts of the failed date. In the device of separation of stages of the rocket fittings are executed with the shoulder of clamping increased in comparison with constructive at normal operation of pyroelements from a line of turn of a joint to an axis of a pyroelement. When one of the pyroelectric elements fails, the weakened parts of the joint are destroyed, freeing the connection between the separated parts of the rocket. Means of withdrawal separate parts of the rocket from each other. However, there is a moment, "shamlawi" a single element joint due to the reversal of separable parts of a rocket (rocket stages or detachable payload) relative to the pyroelectric sensor failed and as a result, an additional loading of elements of the joint. In normal, trouble-free operation of the separation device, the pyroelectric elements are loaded only by longitudinal tensile and shear forces from the loads arising during operation of the rocket on the Ground and in flight. The margin of safety is significantly higher. When the joint is pinched, the joint elements are additionally loaded with a moment and a force along

the axis of the pyroelectric element significantly higher than the force on the separation unit under normal, trouble-free loading.

**Keywords:** *reliability assessment, probability, test, operation, statistics.*

#### **References**

1. Sidnyaev N.I., Makridenko L.A., Gecha V.J., Onufriev V.V., Govor S.A. Determination of high-altitude characteristics of electric rocket engines of spacecraft by methods of experiment planning. *Control problems*, 2017, no. 1, pp. 75–85.

## **Исследование каталитической активности поверхности космического аппарата при взаимодействии с набегающим потоком**

Н.И. Сидняев, Н.С. Климова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: Sidnyaev@bmstu.ru, natali.lesnyh@gmail.com

В работе рассмотрены химические процессы, протекающие в пристеночном слое между набегающим газом и поверхностью космических аппаратов (КА). Представлена динамика поведения атомов при адсорбции. Показан процесс рекомбинации атомов через механизм Или — Райдила. Проведен анализ влияния данных параметров на поверхностные характеристики космического аппарата. Реактивные процессы, вызванные взаимодействием атомов и молекул кислорода с диоксидом кремния и материалами на основе диоксида кремния, очень важны для моделирования химических процессов в промежуточном слое между газом и поверхностью космических аппаратов в атмосферах планет [1]. Механизм зависит от каталитической активности, контролирующей динамику различных химическо-физических процессов с участием O и O<sub>2</sub> на поверхности. Адсорбция атомарного кислорода на поверхностях диоксида кремния в настоящее время недостаточно изучена экспериментально из-за сложностей создания вакуумных камер с должной измерительной аппаратурой, поэтому важны теоретические выкладки, позволяющие исследовать процессы, происходящие на поверхности КА. Например, исследование динамики взаимодействия кислород — диоксид кремния позволяет детально изучить атомарные явления, лежащие в основе процесса хемосорбции, включая процессы возбуждения фононов на подложке диоксида кремния. Подробно изложен механизм столкновения молекул (прямого и непрямого) с использованием метода Монте-Карло и рассчитываются вероятностные характеристики адсорбции для различных кинетических энергий атомов кислорода, ударяющихся о поверхность диоксида кремния [2]. При сопоставлении получен-

ных результатов для двух предложенных полиморфных модификаций получено аналитическое выражение для катализатора, позволяющее определить поведение морфологии поверхности при различной динамике адсорбции. Кроме того, рассмотрены механизмы воздействия при различных реакциях фононов для двух различных полиморфных модификаций на атом кислорода. При этом фононы подложки контролируют и определяют процесс адсорбции. Включение фононов в рассмотрение динамики взаимодействия молекула—поверхность является одним из наиболее интересных аспектов гетерогенных процессов, который часто не учитывают в квантовых расчетах сложных физико-химических процессов, в частности, при проектировании теплозащитных покрытий космического аппарата с высокой экзотермичностью процессов адсорбции. Необходимо отметить, что энергия хемосорбции атомарного кислорода, различная для двух полиморфных модификаций, на самом деле высока и в основном передается фононам как тепловой поток через подложку диоксида кремния.

**Ключевые слова:** космический аппарат, адсорбция, рекомбинация, поверхностные характеристики, механизм Или — Райдила, молекула, атом.

#### Литература

1. Сидняев Н.И. Исследование разрушения поверхности КА при контактном взаимодействии с микрочастицами космической среды // Космические исследования. 2018. Т. 56, № 3. С. 233–242.
2. Титов В.М., Фадеенко Ю.И. Сквозное пробивание при метеоритном ударе // Космические исследования. 1972. Т. 10, № 4. С. 589–595.

### **Investigation of the catalytic activity of the surface of a spacecraft in interaction with the incident flow**

N.I. Sidnyaev, N.S. Klimova

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: Sidnyaev@bmstu.ru, natali.lesnyh@gmail.com

The paper considers the chemical processes occurring in the wall layer between the incident gas and the surface of spacecraft (SC). The dynamics of the behavior of atoms upon adsorption is presented. The process of atom recombination through the Ili-Rydil mechanism is shown. The influence of these parameters on the surface characteristics of the spacecraft was analyzed. Reactive processes caused by the interaction of oxygen atoms and molecules with silicon dioxide and materials based on silicon dioxide are very important for modeling chemical processes in the intermediate layer between gas and the surface of spacecraft in planetary

atmospheres [1]. The mechanism depends on the catalytic activity that controls the dynamics of various chemical-physical processes involving O and O<sub>2</sub> on the surface. At present, the adsorption of atomic oxygen on the surfaces of silicon dioxide has not been studied experimentally due to the difficulties of creating vacuum chambers with proper measuring equipment, therefore theoretical calculations are important that allow us to study the processes occurring on the surface of the spacecraft. For example, a study of the dynamics of the oxygen-silicon dioxide interaction allows a detailed study of the atomic phenomena underlying the chemisorption process, including the processes of phonon excitation on a silicon dioxide substrate. The mechanism of the collision of molecules (direct and indirect) using the Monte Carlo method is described in detail and the probabilistic characteristics of adsorption are calculated for various kinetic energies of oxygen atoms striking the surface of silicon dioxide [2]. When comparing the results obtained for the two proposed polymorphic modifications, an analytical expression is obtained for the catalyst, which allows one to determine the behavior of the surface morphology for various adsorption dynamics. In addition, the mechanisms of action during various phonon reactions for two different polymorphic modifications to the oxygen atom are considered. In this case, the phonons of the substrate control and determine the adsorption process. The inclusion of phonons in the analysis of the dynamics of the molecule — surface interaction is one of the most interesting aspects of heterogeneous processes, which is often not taken into account in quantum calculations in complex physicochemical processes, in particular, when designing heat-shielding coatings for a spacecraft with a high exotherm of adsorption processes. It should be noted that the energy of chemisorption of atomic oxygen, which is different for the two polymorphic modifications, is actually high and is mainly transferred to phonons as a heat flux through a silicon dioxide substrate.

**Keywords:** *spacecraft, adsorption, recombination, surface characteristics, Ili-Rydil mechanism, molecule, atom.*

## References

1. Sidnyaev N.I. Investigation of the destruction of the spacecraft surface during contact interaction with microparticles of the space environment. *Space Research*, 2018, vol. 56, no. 3, pp. 233–242.
2. Titov V.M., Fadeenko Yu.I. Through penetration during a meteorite impact. *Space Research*, 1972, vol. 10, no. 4, pp. 589–595.



## Применение метода Монте-Карло при оценке неопределенности измерения

Н.И. Сидняев, В.А. Никишина

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: Sidnyaev@bmstu.ru, Nikishinava@student.bmstu.ru

В соответствии со стандартом GUM при оценке неопределенности измерения функция распределения явно не используется. Однако стандарт ISO/IEC Guide 98-3:2008 предусматривает расчет стандартной неопределенности по плотности распределения вероятностей, полученной из распределения частот или по предполагаемой плотности распределения вероятностей, отражающей степень уверенности в появлении того или иного события [1]. Этапы трансформирования распределений и получения окончательных результатов не требуют дополнительной метрологической информации и могут быть выполнены с любой допустимой точностью для поставленной задачи. Как только этап постановки задачи выполнен, плотность распределения вероятностей для выходной величины формально полностью определена. Однако вычисление математического ожидания, стандартного отклонения и интервала охвата может потребовать применения численных методов, обладающих некоторой степенью приближения. Метод Монте-Карло является практической альтернативой способу оценки неопределенности по GUM. Метод имеет особое значение, когда линеаризация модели не обеспечивает ее адекватного представления; распределение выходной величины не может быть описано нормальным распределением или масштабированным смещенным  $t$ -распределением. Закон трансформирования неопределенностей позволяет учесть неопределенности входных величин и вычислить стандартную неопределенность оценки выходной величины. Метод основан на использовании плотностей распределения вероятностей входных величин для последующего расчета плотности распределения вероятностей выходной величины [2]. В то время как для применения способа оценивания неопределенности существуют некоторые ограничения, трансформирование распределений всегда позволяет получить плотность распределения вероятностей выходной величины на основе распределений входных величин. После получения плотности распределения вероятностей выходной величины могут быть определены математическое ожидание, используемое в качестве оценки выходной величины, и стандартное отклонение, используемое в качестве стандартной неопределенности этой оценки. Плотность распределения вероятностей величины отражает состояние знаний об этой величине, т. е. она численно определяет степень дове-

рия тем значениям, которые могут быть приписаны упомянутой величине на основе доступной информации.

**Ключевые слова:** измерения, неопределенность, трансформирование распределений, трансформирование неопределенностей, способ оценивания, метод Монте-Карло.

### **Литература**

1. Сидняев Н.И., Никишина В.А. Трансформирование распределений по выражению неопределенности с использованием метода Монте-Карло системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: новые источники роста // II Всерос. науч.-практич. конф. (Москва, 23 апреля 2019 г.): материалы конф. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. С. 145–151.
2. Сидняев Н.И., Садыхов Г.С., Савченко В.П. Модели и методы оценки остаточного ресурса изделий радиоэлектроники. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 382 с.

## **Application of the Monte Carlo method in the estimation of measurement uncertainty**

N.I. Sidnyaev, V.A. Nikishina

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: Sidnyaev@bmsu.ru, Nikishinava@student.bmstu.ru

In accordance with the GUM standard, the distribution function is not explicitly used in estimating measurement uncertainty. However, the standard ISO / IEC Guide 98-3: 2008 provides for the calculation of standard uncertainty in the probability distribution density obtained from the frequency distribution or the estimated probability distribution density, which reflects the degree of confidence in the occurrence of an event. The stages of transforming distributions and obtaining final results do not require additional metrological information and can be performed with any permissible accuracy for the problem [1]. As soon as the stage of the statement of the problem is completed, the probability distribution density for the output quantity is formally completely determined. However, the calculation of the mathematical expectation, standard deviation, and coverage interval may require the use of numerical methods with a certain degree of approximation. The Monte Carlo method is a practical alternative to the GUM uncertainty estimation method. The method is of particular importance when the linearization of the model does not provide its adequate representation; the distribution of the output quantity cannot be described by a normal distribution or a scaled biased t-distribution. The law of transformation of uncertainties allows taking into account the uncertainties of the input quantities and calculating the standard uncertainty of the estimate of the output quantity. The method is based on using

the probability density of the input quantities for the subsequent calculation of the probability density of the output quantity. While there are some limitations to the application of the method of estimating uncertainty, transforming distributions always allows one to obtain the probability density of the output quantity based on the distribution of the input quantities [2]. After obtaining the probability distribution density of the output quantity, the mathematical expectation used as an estimate of the output value and the standard deviation used as the standard uncertainty of this estimate can be determined. In addition, the probability distribution density can be used to obtain a coverage interval for the output quantity corresponding to a given probability. The probability density distribution of a quantity reflects the state of knowledge about this quantity, i.e., it numerically determines the degree of confidence in those values that can be attributed to the said quantity on the basis of available information.

**Keywords:** *measurement, uncertainty, transformations distributions, transformations of uncertainties, method of estimation, Monte Carlo method.*

#### References

1. Sidnyaev N.I., Nikishina V.A. Transformation of distributions by expression uncertainty using Monte Carlo method of full life cycle management System of high-tech products in mechanical engineering: new sources of growth. In: *II All-Russian scientific and practical conference (Moscow, April 23, 2019): Conference proceedings.* Moscow, BMSTU Publ., 2019, pp. 145–151.
2. Sidnyaev N.I., Sadikhov G.S., Savchenko V.P. *Models and methods for assessing the residual life of radio electronics products.* Moscow, BMSTU Publ., 2015. 382 p.

### Уровни представления обработки знаний экспертных технических систем при проектных оценках

Н.И. Сидняев, Ю.И. Бутенко, Е.Е. Болотова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: Sidnyaev@bmstu.ru, iuliabutenko2015@yandex.ru,  
lisayshka\_bolotova@mail.ru

Поддержка принятия решений в сложных ситуациях необходима в различных областях авиаракетостроения и сферах деятельности, где требуются обоснованные, логически доказуемые аргументы в оперативном и стратегическом управлении технологиями на предприятии. При принятии решений необходимо проведение детального моделирования последствий предполагаемого решения, поиск оптимального пути достижения заданного результата с помощью технологий имитационного проектирования. С подобными задачами успешно справляются современные системы искусственного интеллекта, а именно экспертные технические системы — комплексы программных

средств, способные частично или полностью заменять специалиста-эксперта при решении сложных задач в какой-либо предметной области. Такие системы предназначены для принятия решений в проблемных ситуациях, возникающих при технической диагностике и эксплуатации аэрокосмической техники.

Ядром любой интеллектуальной системы является база знаний, которая описывает определенную предметную область. Представление знаний в системах искусственного интеллекта — это не только фундаментальное понятие, но и решающий аспект их разработки. Представление знаний — одно из направлений в исследованиях по искусственному интеллекту, изучающее способы описания объектов реального мира. Модели представления знаний позволяют перевести пассивную информацию, хранящуюся в виде чертежей и документов, в активный информационный ресурс. Выбор правильной модели знания в экспертных системах играет важную роль на стадии проектирования и в большинстве случаев становится основой выбора подхода к решению той или иной задачи. На сегодняшний день существует несколько различных моделей представления знаний: фреймы, семантические сети, продукционные модели, логика предикатов. Каждая модель имеет свои преимущества и недостатки, поэтому подбирается индивидуально в зависимости от поставленных задач. Актуальной и практически значимой задачей является построение информационной структуры для представления данных в области авиакосмического приборостроения, которая обеспечит эффективную работу экспертной системы в решении сложных задач, связанных с конструктивными элементами летательных аппаратов. Такой моделью является интегрированная модель представления знаний — абстрактная иерархическая структура, объединяющая графовую структуру, фреймы и предикаты [1]. Для реализации подобной структуры данных требуется принимать во внимание и предикатные символы, которые обеспечивают описание сущности, представленной в данной структуре. Такая структура должна гарантировать непротиворечивость описаний с объектами и их отношениями в реальном производстве, сохраняя соответствие с описываемым технологическим процессом. Данная модель обеспечит наиболее эффективную работу экспертной системы в области авиакосмического приборостроения.

**Ключевые слова:** база знаний, экспертная система, летательный аппарат, конструкция, знания.

### **Литература**

1. Сидняев Н.И., Бутенко Ю.И., Болотова Е.Е. Экспертная система продукционного типа для создания базы знаний о конструкциях летательных аппаратов // *Авиакосмическое приборостроение*. 2019. № 6. С. 38–52.  
DOI: 10.25791/aviakosmos.06.2019.676

---

## **Levels of representation processing of knowledge of expert technical systems at design estimations**

N.I. Sidnyaev, Y.I. Butenko, E.E. Bolotova

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: Sidnyaev@bmstu.ru, iuliiabutenko2015@yandex.ru,  
lisayshka\_bolotova@mail.ru

Decision-making support in complex situations is needed in various areas of aircraft engineering and areas of activity where reasonable, logically provable arguments are required — in operational and strategic management of technologies at the aviation enterprise. In the decision-making process it is necessary to conduct detailed modeling of the consequences of the proposed decision, search for the optimal way to achieve the desired result using simulation technologies. Modern artificial intelligence systems successfully cope with such tasks, namely expert systems — complexes of software that can partially or completely replace an expert in solving complex problems in any subject area. Such systems are designed for decision — making in problem situations arising in the diagnosis and operation of aerospace equipment.

The core of any intelligent system is a knowledge base that describes a specific subject area. The representation of knowledge in artificial intelligence systems is not only a fundamental concept, but also a crucial aspect of their development. Knowledge representation is one of the areas in artificial intelligence research that studies ways to describe real-world objects. Knowledge representation models allow you to translate passive information stored in the form of drawings and documents into an active information resource. Choosing the right model of knowledge in expert systems is important, and in most cases becomes the basis for choosing an approach to solving a problem. Today there are several different models of knowledge representation: frames, semantic networks, production models, predicate logic. Each model has its advantages and disadvantages, so it is selected individually depending on the tasks. An actual and practically significant task is to build an information structure for the presentation of data in the field of aerospace instrumentation, which will ensure the effective operation of the expert system in solving complex problems associated with the structural elements of aircraft. Such a model is the integrated model of knowledge representation—an abstract hierarchical structure that combines graph structure, frames and predicates [1]. To implement such a data structure, you must also take into account the predicate symbols that provide a description of the entity represented in the structure. Such structure should guarantee consistency of descriptions with objects and their relations in real production, keeping conformity with the described techno-

logical process. This model will provide the most efficient operation of the expert system in the field of aerospace instrumentation.

**Keywords:** *knowledge base, expert system, aircraft, construction, knowledge.*

#### References

1. Sidnyaev N.I., Butenko Y.I., Bolotova E.E. Expert system of production type for creating a knowledge base on aircraft structures. *Avaikosmicheskoe priborostroenie — Aerospace Instrument-Making*, 2019, no. 6, pp. 38–52.

## Вибрационная прочность

О.Б. Скворцов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИМАШ РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>НТЦ «Балансмаш», Москва, Россия

E-mail: skv@balansmash.ru

Приведены рекомендации по дополнению системы вибрационного мониторинга для решения задач диагностики, прогнозирования и защиты с новыми инновационными решениями, обеспечивающими повышение достоверности диагностирования и защиты оборудования. Предложенные решения позволяют кроме оценок текущего состояния агрегата по результатам измерения интенсивности вибрации оценить степень износа и учесть влияние такого износа и дефектов в работе многоуровневой системы автоматической защиты агрегата.

**Ключевые слова:** *вибрация, защита, мониторинг, диагностика, прогнозирование, резервирование, усталость, износ, бюджетное решение.*

## Vibration strength

O.B. Skvorcov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>IMASH RAS, Moscow, Russia,

<sup>2</sup>STC “Zavod Balansirovochnykh mashin”, Moscow, Russia

E-mail: skv@balansmash.ru

Recommendations are given on supplementing the vibration monitoring system for solving the problems of diagnostics, forecasting and protection with new innovative solutions that provide increased reliability of diagnosis and equipment protection. The proposed solutions allow, in addition to assessing the current state of the unit from the results of measuring the intensity for vibration, to assess the degree of wear and take into account the effect of such wear and defects in the operation of a multi-level system of automatic protection for the unit.

**Keywords:** *vibration, protection, monitoring, diagnostics, forecasting, redundancy, fatigue, wear, budget solution.*

**Исследование механических свойств  
дилатантной упруговязкопластичной жидкости  
на основе полисиликона**

Е.В. Славкина, М.В. Астахов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал, Калуга, Россия  
E-mail: e.v.slavkina@gmail.com, mvastahov@gmail.com

Рассмотрены перспективы создания комбинированной адаптивной конструкции на основе композитных материалов, с внутренним заполнением дилатантной упругопластичной жидкостью для повышения стойкости конструкции к ударным нагрузкам. Установлено, что упругопластичная жидкость в момент удара превращается в месте удара в твердое упругое вещество, т. е. деформация в течение короткого промежутка времени линейно зависит от внешних сил. Проведены экспериментальные исследования на удар свободно падающим грузом на цилиндрический образец полисиликона. Определено изменение геометрической формы дилатантной жидкости при ударе свободно падающего шара. На основе теории упругости определены предел прочности, модуль продольной и поперечной упругости, коэффициент Пуассона при действии ударной нагрузки на полисиликон.

**Ключевые слова:** дилатантная жидкость, упруговязкопластичная жидкость, адаптивная конструкция, повышение ударопрочности, ударная нагрузка.

**The research of the mechanical properties  
of dilatant visco-elastic fluid based on polysilicon**

E.V. Slavkina, M.V. Astakhov

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga branch, Kaluga, Russia  
E-mail: e.v.slavkina@gmail.com, mvastahov@gmail.com

The perspectives of creating a combined adaptive structure based on composite materials with internal filling with a dilatant elastoplastic fluid to increase the resistance of the structure to hit loads are considered. It has been established: an elastoplastic fluid at the moment of hit turns into a solid elastic substance at the point of hit, i.e. deformation over a short period of time linearly depends on external forces. Experimental studies on the hit of a freely falling load on a cylindrical polysilicon sample were carried out. The change in the geometric shape of the dilatant fluid upon hit of a freely falling ball is determined. Based on the theory of elasticity, the ultimate strength, the modulus of longitudinal and transverse elasticity, and the Poisson's ratio under the action of an hit load on a polysilicon are determined.

**Keywords:** dilatant fluid, visco-elastic fluid, adaptive design, increased hit resistance, hit load.

## Обоснование выбора параметров гидро- и пневмогасителей колебаний подвижного состава

Л.А. Сладкова, Н.С. Лавлинская

Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия  
E-mail: rich.cat2012@yandex.ru

Для обеспечения показателей комфортности и безопасности передвижения пассажиров и грузов железнодорожным транспортом предложена научно обоснованная и экспериментально подтвержденная методика выбора рациональных параметров гидравлических гасителей колебаний. Используемые методы исследований основаны на системном анализе информации по направлению исследований, математическом моделировании физических процессов взаимодействия колеса с рельсом, численном эксперименте, законах теоретической механики [1, 2]. Исследовано изменение амплитуды колебательного процесса при поперечном и вертикальном расположении гидравлических гасителей. Введенные в расчеты допущения о пропорциональности реакций от взаимодействия колесной пары с рельсом и прогиба позволили получить результаты, соответствующие действительным с высокой степенью достоверности. Расчетные величины силовых воздействий на подвижной состав соответствуют реальным.

По результатам исследований разработаны динамическая модель и методика оценки колебательных процессов, происходящих при перемещении подвижного состава по пути. На основе разработанной модели и проведенного численного эксперимента предложена практическая реализация в виде рекомендаций по выбору рациональных параметров гидрогасителей подвижного состава.

**Ключевые слова:** подвижной состав, колебания, гидравлический гаситель колебаний, моделирование, техническое решение.

### Литература

1. Савоськин А.Н., Бурчак Г.П., Васильев А.П. Динамика тягового подвижного состава: Часть I. Конспект лекций по дисциплинам «Динамика систем», «Основы механики подвижного состава», «Механическая часть э.п.с.» / под ред. А.Н. Савоськина. Москва: РУТ (МИИТ), 2017. 91 с.
2. Вершинский С.В., Данилов В.Н., Хусидов В.Д. Динамика вагона: учебник для вузов ж.-д. трансп. / под ред. С.В. Вершинского. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Транспорт, 1991. 360 с.



## The justification for the choice of parameters of hydro- and pneumatic oscillations of sladkov's rolling stock

L.A. Sladkova, N.S. Lavlinskay

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia  
E-mail: rich.cat2012@yandex.ru

In order to ensure the comfort and safety of the movement of passengers and cargo by rail, a scientifically sound and experimental method of choosing rational parameters of hydraulic extinguishers has been proposed by rail. The methods of research used are based on system analysis of information on the direction of research, mathematical modeling of physical processes of interaction of the wheel with the rail, numerical experiment, foundations of theoretical mechanics [1, 2]. The change in the amplitude of the vibrational process in the transverse and vertical position of hydraulic extinguishers has been investigated. The assumptions introduced in the calculations about the proportionality of reactions from the interaction of the wheel pair with the rail and the bend, allowed to obtain results corresponding to the actual with a high degree of confidence. Estimated magnitudes of force on the rolling stock correspond to real.

Based on the results of the studies, a dynamic model and a method of assessing vibrational processes that occur when rolling stock moves along the way has been developed. On the basis of the developed model and the numerical experiment, practical implementation is proposed in the form of recommendations on the choice of rational parameters of rolling stock hydrogas.

**Keywords:** *rolling stock, vibrations, hydraulic oscillation extinguisher, modeling, technical solution.*

### References

1. Savoskin A.N., Burchak G.P., Vasilyev A.P. *Dynamics of traction rolling stock: Part I. Consett lectures on disciplines "Dynamics of Systems," "Basics of mechanics of rolling stock," "Mechanical part of e.p.s."* A.N. Savoskina, ed. Moscow, RUT (MIIT) Publ., 2017, 91 p.
2. Vershinskiy S.V., Danilov V.N., Husidov V.D. *Car Dynamics: Textbook for universities.* S.V. Vershinsky, ed. 3rd ed., rev. and enl. Moscow, Transport Publ., 1991, 360 p.

## **О новом способе описания больших поворотов в виде комбинации скалярной и векторной составляющих**

Ф.Д. Сорокин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mails: orokinfd@bmstu.ru

Предложен новый способ описания вращения различных деталей (валов, колец подшипников, зубчатых колес и т.п.), предназначенный для применения в задачах роторной динамики. Целью работы является преодоление проблемы особых углов. Трехмерное вращение рассматривается как комбинация двух последовательных поворотов: первый — вокруг неподвижной оси (ось ротора в исходном состоянии), второй — вокруг оси, перпендикулярной предыдущей. Второй поворот задается вектором Эйлера, составленным всего из двух проекций, так как его проекция на ось первого поворота равна нулю. Общее количество кинематических параметров остается равным трем, как и в классическом случае, однако предложенный способ не приводит к вырожденным кинематическим уравнениям при условии, что второй поворот не превышает значения  $360^\circ$ . Последнее ограничение в роторной динамике выполняется практически всегда, поэтому разработанный способ рекомендуется именно для задач роторной динамики. Приведены примеры, иллюстрирующие новые кинематические уравнения.

**Ключевые слова:** большие повороты, кинематика, роторная динамика, тензор поворота, тензор Жилина.

## **On a new way of describing large rotations in the form of a combination of scalar and vector components**

F.D. Sorokin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: sorokinfd@bmstu.ru

A new method for describing the rotation of various parts (shafts, bearing rings, gears, etc.), intended for use in the problems of rotary dynamics, is proposed. The goal is to overcome the problem of special angles. Three-dimensional rotation is considered as a combination of two consecutive rotations: the first-around a fixed axis (the axis of the rotor in the initial state), the second-around an axis perpendicular to the previous one. The second rotation is given by an Euler vector consisting of only two projections, since its projection on the axis of the first rotation is zero. The total number of kinematic parameters remains equal to three, as in the classical case, but the proposed method does not lead to degeneration of kinematic equations provided that the second rotation does not exceed

360°. The last limitation in rotary dynamics is almost always fulfilled, so the developed method is recommended for rotary dynamics problems. Examples are given to illustrate the new kinematic equations.

**Keywords:** *large rotations, kinematics, rotor dynamics, rotational tensor, Zhilin tensor.*

## **Расчет напряженно-деформированного состояния витой трубки с эллиптическим поперечным сечением**

А.Г. Сорокина

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: sorokinaag@bmstu.ru

Рассматривается геликоидально симметричная (витая) трубка с эллиптическим поперечным сечением, нагруженная внутренним давлением. Напряженно-деформированное состояние трубки рассчитывается сочетанием метода конечных разностей и энергетического метода. Производные по контурной координате заменяются конечными разностями. Производные по винтовой (продольной) координате для скалярных величин равны нулю, для векторных — сводятся к векторному умножению на вектор крутки. С помощью указанных операций вычисляются параметры первой и второй квадратичных форм, через которые находятся энергия деформаций и потенциал внутреннего давления. Неизвестные перемещения, задаваемые в наборе точек контура, находятся минимизацией полного потенциала механической системы. Приведены результаты численного расчета при различных сочетаниях размеров и давления.

**Ключевые слова:** *геликоидальная симметрия, конечные разности, оболочка, энергия деформаций.*

## **Calculation of the stress-strain state of a twisted tube with an elliptical cross-section**

A.G. Sorokina

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: sorokinaag@bmstu.ru

A helicoidally symmetric (twisted) tube with an elliptical cross-section loaded with internal pressure is considered. The stress-strain state of the tube is calculated by a combination of the finite difference method and the energy method. The contour coordinate derivatives are replaced by finite differences. Derivatives on screw (longitudinal) coordinate for scalar quantities are equal to zero, and for vector are reduced to vector multipli-

cation on a twist vector. With the help of these operations, the parameters of the first and second quadratic forms are calculated, through which the deformation energy and the internal pressure potential are found. The unknown displacements given in the set of contour points are found by minimizing the full potential of the mechanical system. The results of numerical calculation for different combinations of sizes and pressures are presented.

**Keywords:** *helical symmetry, finite differences, shell, strain energy.*

### **Адаптация промежуточной аттестации уровня знаний студентов к современной информационно-социальной среде**

К.А. Стихно

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В условиях бурного развития и широкого использования студентами социальных сетей, для того чтобы обеспечить эффективность промежуточной аттестации, приходится учитывать эти новые технологические возможности и искать новые критерии оценки знаний студентов. Рассматриваются возможные параметры и методика их оценки, проблемы идентификации автора и расчета вклада студента, возникающие при защите заочно выполняемых индивидуальных заданий, и их возможные решения, а также новые форматы очной промежуточной аттестации и их ограничения.

### **Adapting intermediate students' attestation to the recent level of social media and networking communication**

C.A. Stikhno

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

In the circumstances of wide spreading of different social networks among students it's vital to maintain an adequate level of intermediate attestation in order to understand actual level of student's knowledge. Various parameters and means of their estimation are considered. Author identification problem and possibilities and restrictions in distance or internal tests are discussed.

## **Устойчивость по Якоби управляемых динамических систем и восстановление коэффициентов обратной связи с использованием гибридных алгоритмов**

А.В. Сулимов, П.М. Шкапов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
Филиал МГУ им. М.В. Ломоносова в г. Севастополе, Россия  
E-mail: spm@bmstu.ru

Эффективным математическим методом исследования динамических систем является теория Косамби–Картана–Черна (ККЧ). При использовании этого подхода эволюцию динамической системы описывают в соответствующих геометрических терминах. С целью геометризации эволюции системы вводятся нелинейная связность и связность типа Бервальда, связанные с системой дифференциальных уравнений второго порядка. Это дает возможность получить пять геометрических инвариантов теории ККЧ. Второй инвариант (также называемый тензором кривизны отклонения) определяет устойчивость системы по Якоби. Предполагается, что приближенные собственные значения второго инварианта найдены из результатов эксперимента и последующей компьютерной обработки. Соответствующая обратная задача на собственные значения формулируется так: найти свободные параметры системы по неточным косвенным (полученным при измерениях) данным. Критериальная функция задачи строится на основе сравнения двух спектров: полученного из эксперимента и найденного из решения прямой задачи на собственные значения (для второго инварианта, зависящего от текущих свободных параметров системы как переменных). При решении рассматриваемой обратной задачи на собственные значения используется оптимизационный подход. Известно, что обратные задачи обычно относятся к классу некорректно поставленных, при этом метод регуляризации Тихонова является стандартным для получения корректной постановки задачи. Так как экспериментальные данные являются неточными и неполными, а собственные спектры в общем случае содержат кратные собственные значения, то критериальная функция в общем случае имеет локальные минимумы и не является всюду дифференцируемой. Следовательно, необходимо использовать методы глобальной недифференцируемой оптимизации. Предложены два оригинальных гибридных алгоритма глобальной оптимизации, объединяющих стохастический кратный алгоритм столкновения частиц с централизованной выборкой (для сканирования пространства поиска) и детерминированные методы (для локального спуска). В первом алгоритме для локального поиска используется метод кривой, заполняющей пространство. Во втором алгоритме локальный поиск реализуется симплекс-методом Нелдера–

Мида без использования производных. Представлены результаты успешных вычислительных экспериментов по восстановлению коэффициентов обратной связи эллиптического маятника с управлением. Подход может быть использован для разработки математических моделей и анализа устойчивости управляемых динамических систем в рамках теории ККЧ.

**Ключевые слова:** динамическая система, устойчивость по Якоби, геометрический инвариант, обратная задача, глобальная оптимизация, гибридный алгоритм, эллиптический маятник.

## **Jacobi stability of controllable dynamical systems and restoration of feedback gains using hybrid algorithms**

A.V. Sulimov, P.M. Shkapov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
Lomonosov Moscow State University Branch in Sevastopol, Russia  
E-mail: spm@bmstu.ru

An effective mathematical method for the study of controllable dynamical systems is represented by the Kosambi–Cartan–Chern (KCC) theory. In this approach they describe the time evolution of a system in corresponding geometric terms. On the purpose to geometrize the evolution of the system a nonlinear connection and a Berwald type connection (associated with a system of second order differential equations) are introduced. This makes it possible to obtain five geometrical KCC-invariants. The second invariant (also named curvature deviation tensor) determines the Jacobi stability of the system. It is supposed that the eigenvalues of the second invariant are known approximately from experiment and computer processing. The corresponding inverse eigenvalue problem is formulated as follows: to find free parameters of the system from inaccurate indirectly measured data. The error function of the problem is constructed on base of comparison of two spectra: one from experiment and one from solving the direct eigenvalue problem (for the second invariant depending on current free parameters as variables). The optimization approach is used to solve the inverse eigenvalue problem in hand. It is well-known that inverse problems are generally ill-posed, so the Tikhonov regularization should be implemented in order to reformulate the problem into a well-posed statement. As the experimental data are inaccurate and incomplete, and the eigenvalue spectra may contain multiple eigenvalues, the error function in general case has local minima and is not everywhere differentiable. So it is necessary to use global non-differentiable optimization methods. Two novel hybrid global optimization algorithms that combine the stochastic Central Based Multi-Particle Collision Algorithm (for scanning the search space) and deterministic methods (for local searching) are

introduced. Space-filling curve method is inserted during the local search in the first algorithm. The second algorithm implements the local search procedure by use of the derivative-free Nelder–Mead simplex method. Results of successful computational experiments on restoration of feedback gains of the controllable elliptic pendulum system are presented. The approach may be used for developing mathematical models and stability analysis of controllable dynamical systems in the framework of the KCC theory.

**Keywords:** *dynamical system, Jacobi stability, geometric invariant, inverse problem, global optimization, hybrid algorithm, space-filling curve, elliptic pendulum.*

## **Восстановление параметров управляемой динамической системы, неустойчивой по Якоби, с использованием гибридных алгоритмов**

В.Д. Сулимов, П.М. Шкапов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: spm@bmstu.ru

Подход на основе теории Косамби — Картана — Черна (теории ККЧ) является эффективным математическим методом исследования управляемых динамических систем. Введение нелинейной связности и связности типа Бервальда дает возможность описывать свойства системы в терминах пяти геометрических инвариантов. Второй инвариант (называемый также тензором кривизны отклонения) характеризует устойчивость системы по Якоби. Во многих случаях применение теории ККЧ требует редукции уравнений эволюции системы к системе нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка. Это позволяет определить в явном виде тензор кривизны отклонения и соответствующий спектр собственных значений, которые зависят от свободных параметров динамической системы. Предполагается, что указанные собственные значения могут быть получены приближенно из результатов эксперимента с последующей компьютерной обработкой. Соответствующая обратная задача на собственные значения состоит в определении свободных параметров системы по косвенным, заданным неточно (измеренным) данным. Критериальная функция обратной задачи строится на основе сравнения двух множеств данных: заданного неточно целевого спектра собственных значений и спектра, вычисленного в результате решения прямой задачи на собственные значения для текущих значений свободных параметров системы как переменных. При решении обратной задачи реализован оптимизационный подход. В общем случае обратные задачи относят-

ся к классу некорректно поставленных, поэтому метод регуляризации Тихонова является стандартным для получения соответствующей корректной постановки задачи. Вследствие неточности и неполноты входных данных, а также возможного наличия в собственных спектрах кратных собственных значений критериальная функция обычно имеет локальные минимумы и не является всюду дифференцируемой. Этим обусловлена необходимость применения методов глобальной недифференцируемой оптимизации. Представлены два оригинальных гибридных алгоритма глобальной оптимизации, объединяющих стохастический кратный алгоритм столкновения частиц с централизованной выборкой (сканирование пространства поиска), и детерминированные методы (локальный спуск). В первом алгоритме при решении подзадачи недифференцируемой локальной минимизации вводятся двухпараметрические сглаживающие аппроксимации с итерационным уточнением. Во втором алгоритме реализована процедура локального поиска методом Хука — Дживса (без использования производных). Приведены результаты вычислительных экспериментов по определению свободных параметров управляемой, неустойчивой по Якоби динамической системы с двумя степенями свободы. Предложенный подход может быть использован для разработки математических моделей динамических систем в рамках теории ККЧ.

**Ключевые слова:** динамическая система, устойчивость по Якоби, геометрический инвариант, обратная задача, глобальная оптимизация, гибридный алгоритм.

## **Restoration of parameters of the Jacobi unstable controllable dynamical system using hybrid algorithms**

V.D. Sulimov, P.M. Shkapov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: spm@bmstu.ru

The approach on base of the Kosambi — Cartan — Chern (KCC) theory represents a powerful mathematical method for the investigation of the controllable dynamical systems. Introducing a non-linear connection and a Berwald type connection makes it possible to describe the properties of the system in terms of five geometric invariants. The second invariant (named the curvature deviation tensor) gives the Jacobi stability of the system. Commonly the KCC theory is formulated by reducing the evolution equations of the system to a set of second order nonlinear differential equations. Then the curvature deviation tensor and corresponding eigenvalue spectrum may be obtained explicitly. Both the tensor and eigenvalues depend on free parameters of the system. It is supposed that the eigenvalues of the tensor are known approximately from experiment and



computer processing. The corresponding inverse eigenvalue problem is to find free parameters of the system from indirect inaccurate (measured) data. The error function of the problem is constructed on base of comparison of two sets: the given inaccurate goal eigenvalue spectrum and the spectrum from solving the direct eigenvalue problem with current free parameters of the system as variables. The optimization approach is used to solve the inverse problem. In general case inverse problems are ill-posed, so the Tikhonov regularization is a standard method to reformulate the problem into a well-posed statement. As the input data are inaccurate and incomplete, and the eigenvalue spectra may contain multiple eigenvalues, the error function generally has local minima and is not everywhere differentiable. So it is necessary to use global non-differentiable optimization methods. Two novel hybrid global optimization algorithms that combine the stochastic Central Based Multi-Particle Collision Algorithm (for scanning the search space) and deterministic methods (for the local descent) are introduced. Application of two-parametric smoothing approximations of the error function with iteration refinement is implemented for solving non-differentiable local minimization subproblems in the first algorithm. The derivative-free Hooke — Jeeves method is used for the local search in the second algorithm. Results of successful computational experiments on restoration of free parameters of bi-dimensional Jacobi unstable controllable dynamical system are presented. The approach may be used for developing mathematical models of dynamical systems in the framework of the KCC theory.

**Keywords:** *dynamical system, Jacobi stability, geometric invariant, inverse problem, global optimization, hybrid algorithm.*

## Экспериментальное исследование сверхзвукового воздухозаборника пространственной конфигурации

В.И. Толмачев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: tolmvifn@bmstu.ru

Исследование пространственного сжатия сверхзвукового потока — одно из новых направлений газовой динамики. Разработка и накопление новых данных по таким воздухозаборникам, по методикам расчета, проведение экспериментальных исследований представляют значительный интерес. В докладе обоснована и экспериментально подтверждена возможность и целесообразность создания пространственного воздухозаборника на основе течений в угловых конфигурациях. Предложена конкретная схема воздухозаборника, по разра-

ботанной методике спроектированы и исследованы модели воздухозаборников при числах Маха 2,5 и 3. Экспериментальные исследования доказали работоспособность предложенной схемы воздухозаборника и выявили области удовлетворительного совпадения расчетных и действительных значений параметров потока. Также показано, что течение устойчиво в широком диапазоне изменения коэффициента расхода.

**Ключевые слова:** *сверхзвуковое торможение, пространственный воздухозаборник, скачок уплотнения, угловое тело.*

## **Experimental study of the supersonic three-dimensional inlet**

V.I. Tolmachev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: [tolmvifn@bmstu.ru](mailto:tolmvifn@bmstu.ru)

This paper deals with the prediction of the inviscid supersonic flow in three-dimensional (corner-type) inlets. The inlet has two compressing wedges which generate two shock waves. Two possible shock configurations could be generated by the intersection of two shock waves. One of them is called a regular reflection configuration and another — a Mach disk configuration. These possibilities were investigated for a symmetrical geometry. The regular reflection wave configuration was used to design of two models of supersonic inlets. Detailed experimental data are presented for  $M = 2.5$  and  $M = 3.0$ .

**Keywords:** *intake, shock waves interaction, corner body.*

## **Особенности ламинарных конвективных течений в горизонтальных слоях жидкости**

А.И. Федюшкин

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия  
E-mail: [fai@ipmnet.ru](mailto:fai@ipmnet.ru)

Приведены результаты численного моделирования ламинарных конвективных течений и тепломассопереноса в горизонтальных слоях жидкости и сравнение с экспериментальными данными. Рассмотрены нелинейные особенности конвективных течений в горизонтальных слоях жидкости для разных определяющих безразмерных параметров и граничных условий. Показано влияние переменной ускорения силы тяжести на структуру конвективного течения, распределение температуры и на форму свободной поверхности.

**Ключевые слова:** естественная конвекция, противотоки, численное моделирование, стратификация, структура течения, свободная поверхность, переменность гравитации.

## **Peculiarity of laminar convective flows in horizontal liquid layers**

A.I. Fedyushkin

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia  
E-mail: fai@ipmnet.ru

The results of numerical simulation of convective flows and heat and mass transfer in horizontal liquid layers under different defining parameters and boundary conditions are presented. Nonlinear peculiarity of convective flows in horizontal liquid layers is shown. The influence of gravity acceleration variability on the convective flow structure, temperature distribution and free surface shape is shown.

**Keywords:** natural convection, counter-flows, numerical modeling, flow structure, stratification, free surface, gravity variability.

## **Коалесценция капель**

А.И. Федюшкин, А.Н. Рожков

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия  
E-mail: fai@ipmnet.ru, rozhkov@ipmnet.ru

В работе численно и экспериментально исследуется задача о динамике слияния двух капель ньютоновской жидкости. Численное моделирование основано на решении уравнений Навье — Стокса для двухслойной системы жидкость — воздух. С помощью численного моделирования показано изменение форм капель во времени для разных свойств жидкостей. Результаты численного моделирования по динамике коалесценции капель сравниваются с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** численное моделирование, эксперимент, коалесценция капель.

## Coalescence of the drops

A.I. Fedyushkin, A.N. Rozhkov

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia  
E-mail: fai@ipmnet.ru, rozhkov@ipmnet.ru

The problem of the dynamics of the coalescence of two Newtonian fluid droplets is investigated numerically and experimentally. The numerical simulation is based on the solution of Navier — Stokes equations for a two-layer liquid-air system. The change of droplet shapes over time for different properties of liquids is shown by numerical simulation. The results of numerical simulation of droplet coalescence dynamics are compared with experimental data.

**Keywords:** *numerical simulation, experiment, coalescence of drops.*

## Гидродинамические когерентные системы и метрические структуры на многообразиях Монжа

Н.Н. Фимин

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия  
E-mail: oberon@kiam.ru

Введено понятие метрики на многообразии потенциалов Монжа динамической системы. Сформулирована концепция когерентности непрерывных вихревых структур в терминах девиации геодезических линий на заданном многообразии. Введены критерии распада и коллапса вихревой непрерывной системы.

Геометризация описания вихревых гидродинамических систем может быть выполнена на основе введения потенциалов Монжа — Клебша, что приводит к гамильтоновой форме исходных уравнений Эйлера. Для этого мы строим кинетический потенциал Лагранжа с помощью поля скорости потока, которое предварительно определяется с помощью набора скалярных потенциалов Монжа и термодинамических соотношений. Следующим шагом является преобразование полученного лагранжиана с помощью преобразования Лежандра в функцию Гамильтона и стандартное введение обобщенных импульсов, канонически сопряженных с переменными конфигурации в новом фазовом пространстве динамической системы. Далее, используя полученную гамильтонову функцию, определим гамильтоново пространство на кокасательном расслоении над многообразием потенциалов Монжа. Вычисляя гессиан гамильтониана, получаем коэффициенты фундаментального тензора гамильтонова пространства, определяющие его метрику. Далее мы определяем аналоги коэффициентов Кристофф-

феля для  $N$ -линейной связи. Рассматривая уравнения Эйлера — Лагранжа с полученными коэффициентами связности, мы приходим к геодезическим уравнениям в виде горизонтальных и вертикальных траекторий в гамильтоновом пространстве. В рассматриваемом случае нетривиальные решения могут иметь только дифференциальные уравнения для вертикальных путей. Анализируя полученную систему уравнений геодезического движения с точки зрения устойчивости решений, можно получить важные физические выводы относительно исходной гидродинамической системы. Для этого мы исследуем возможное увеличение или уменьшение бесконечно малого расстояния между геодезическими вертикальными траекториями (решения соответствующей системы уравнений Якоби — Картана). В результате мы можем сформулировать очень общие критерии распада и разрушения вихревой континуальной системы.

**Ключевые слова:** динамика вихрей, девиация геодезических, статистическое многообразие, метрический тензор, лагранжева плотность.

## The hydrodynamic coherent systems and metric structures on the Monge manifolds

N.N. Fimin

Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia  
E-mail: oberon@kiam.ru

The concept of metric on the manifold of Monge potentials of dynamic system is introduced. The concept of coherence of continuous vortex structures in terms of deviation of geodesic lines on a given manifold is formulated. The criteria for the decay and collapse of a vortex continuous system are introduced.

Geometrization of the description of vortex hydrodynamic systems can be made on the basis of the introduction of the Monge — Clebsch potentials, which leads to the Hamiltonian form of the original Euler equations. For this, we construct the kinetic Lagrange potential with the help of the flow velocity field, which is preliminarily determined through a set of scalar Monge potentials, and thermodynamic relations. The next step is to transform the resulting Lagrangian by means of the Legendre transformation to the Hamiltonian function and correctly introduce the generalized impulses canonically conjugate to the configuration variables in the new phase space of the dynamical system. Next, using the Hamiltonian function obtained, we define the Hamiltonian space on the cotangent bundle over the Monge potential manifold. Calculating the Hessian of the Hamiltonian, we obtain the coefficients of the fundamental tensor of the Hamiltonian space defining its metric. Next, we determine analogs of the Christoffel coefficients for the  $N$ -linear connection. Considering the Euler —

Lagrange equations with the connectivity coefficients obtained, we arrive at the geodesic equations in the form of horizontal and vertical paths in the Hamiltonian space. In the case under study, nontrivial solutions can have only differential equations for vertical paths. Analyzing the resulting system of equations of geodesic motion from the point of view of the stability of solutions, it is possible to obtain important physical conclusions regarding the initial hydrodynamic system. To do this, we investigate a possible increase or decrease in the infinitesimal distance between the geodesic vertical paths (solutions of the corresponding system of Jacobi — Cartan equations). As a result, we can formulate very general criteria for the decay and collapse of a vortex continual system.

**Keywords:** *vortex dynamics, deviation of geodesics, statistical manifold, metric tensor, Lagrangian density.*

### **Лабораторные источники гравитационных волн**

И.В. Фомин, В.О. Гладышев, В.С. Горелик,  
В.Л. Кауц, А.В. Каютенко, Е.А. Шарандин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: ingvor@inbox.ru

Гравитационные волны являются предметом многочисленных теоретических исследований, выполненных с начала двадцатого столетия, и привлекают внимание как источник сведений о ранней Вселенной [1], астрофизических процессах [2] и новое средство передачи информации и энергии на большие расстояния со скоростью света.

Лабораторные источники подразумевают гравитационное излучение малой амплитуды и мощности, и, таким образом, слабые гравитационные волны рассматриваются в качестве малых возмущений пространства-времени Минковского  $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$  на основе линеаризованной теории гравитации Эйнштейна.

В качестве возможного механизма генерирования высокочастотных гравитационных волн рассматривается облучение вещества короткими импульсами мощного лазерного излучения, что подразумевает увеличение характеристик гравитационно-волнового излучения с ростом мощности современных лазеров [3].

Альтернативным механизмом являются параметрические процессы взаимодействия электромагнитных и гравитационных волн в постоянном магнитном поле или в конденсированной диэлектрической среде в результате большой оптической нелинейности конденсированного диэлектрика и резкого замедления групповой скорости света при взаимодействии интенсивного лазерного излучения с веществом [4].

В настоящем докладе данные методы сопоставляются по значениям характеристик индуцированных гравитационных волн, что представляется необходимым для определения перспективных направлений исследований в области генерирования гравитационно-волновых сигналов и их последующего детектирования.

### Литературы

1. Фомин И.В., Червон С.В., Морозов А.Н. Гравитационные волны ранней Вселенной. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 154 с.
2. Maggiore M. Gravitational waves. Volume 1: Theory and experiments. Oxford University Press, 2007. 576 p.
3. Kadlecová G.H., Klíma O., Weber S., Korn G. Eur. Phys. J., 2017, vol. D71. P. 89.
4. Golreik, et al. J. Phys. Conf. Ser., 2018, vol. 1051, no. 1, p. 012001.

## Развитие методов решения задач механики твердого тела с применением математического программного обеспечения

В.Е. Хроматов, О.В. Новикова, Т.Н. Комиссарова, В.Э. Цой

НИУ «МЭИ», Москва, Россия  
E-mail: khromatovvy@mpei.ru

Рассматриваются вопросы изложения курсов механики материалов и конструкций в виде структурно-логических схем, представляющих собой единый метод вывода всех уравнений, описывающих напряженно-деформированное состояние стержней, пластин, цилиндрических оболочек, осесимметричной задачи теории упругости в виде таблиц и схем. Для решения практических задач расчетов на прочность и жесткость элементов машиностроительных конструкций применяется программное обеспечение математических пакетов Mathcad, MATLAB, Mathematica и метод конечных элементов при изучении студентами дополнительных методов решения задач механики твердого тела в центре образования «Механика, энергетика и машиностроение» в НИУ «МЭИ». Представлены вопросы включения в курсы дисциплин механико-математического цикла историко-биографических сведений об ученых — основоположниках научных направлений и изучаемых дисциплин.

**Ключевые слова:** механика материалов и конструкций, методы решения задач механики твердого тела, математическое программное обеспечение, историко-биографических сведений.

## **Development of problem solving methods of solid mechanics using mathematical software**

V.E. Khromatov, O.V. Novikova, T.N. Komissarova, V.E. Tsoi

National research university «MPEI», Moscow, Russia  
E-mail: khromatovvy@mpei.ru

Questions of presenting courses of mechanics of materials and structures in the form of structural logic diagrams, which are a single method for deriving all equations describing the stress-strain state of rods, plates, cylindrical shells, and the axisymmetric problem of elasticity theory in the form of tables and diagrams, are considered. To solve the practical problems of calculating the strength and stiffness of elements of engineering structures, the software of mathematical packages Mathcad, MATLAB, Mathematika, the finite element method when students study additional methods for solving problems of solid mechanics at the education center "Mechanics, Energy and Engineering" at NRU "MPEI" are used. The questions of the inclusion in the courses of disciplines of the mechanical and mathematical cycle of historical and biographical information about scientists-founders of scientific fields and the studied disciplines are presented.

**Keywords:** *mechanics of materials and structures, methods for solving problems of solid mechanics, mathematical software, historical and biographical information.*

## **Задачи о мягкой встрече двух точек на орбите с использованием эллипса ожидания**

С.Б. Хусаинов, К.Б. Обносов, П.М. Шкапов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: saparboy.xusainov@mail.ru

В данной работе рассмотрены задачи о мягкой встрече двух точек на круговой орбите с использованием эллипса ожидания. Мягкая встреча двух точек в некоторый момент времени — это совпадение в этот момент их координат и скоростей. Получены аналитические и графические зависимости от начального угла рассогласования таких величин, как длительность активных участков, их угловые протяженности, параметры промежуточной эллиптической орбиты и время всего маневра.



## **Problems of soft meeting of two points in orbit using the expectation ellipse**

S.B. Khusainov, K.B. Obnosov, P.M. Shkapov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: saparboy.xusainov@mail.ru

The report considers the problems of a soft meeting of two points in a circular orbit using an expectation ellipse. A soft meeting of two points at some point in time is a coincidence at that moment of their coordinates and velocities. Analytical and graphical dependences are obtained on the initial mismatch angle of such quantities as the duration of active sites, their angular lengths, parameters of the intermediate elliptical orbit, and the time of the entire maneuver.

## **Ноосферно-циклическая методология синтеза и анализа систем**

О.Н. Цуканов

Российская академия естественных наук, Москва, Россия  
E-mail: tsonzz@mail.ru

Активность ноосферного сознания, расширяющегося до космопланетарного масштаба и способного воспринимать целостную картину мироздания, отличает людей с ноосферным мышлением от людей с обычным мышлением. А поскольку человек творит в системе космических циклов, то ноосферное мышление является основой ноосферно-циклического мировоззрения в процессе творения циклов как будущетворения.

Ноосферное мышление объективно направлено и на понимание того, что в процессе будущетворения на первом месте должны стоять свойства и качество синтезируемых систем, а процесс формирования образующих их объектов как энергоинформационных сфер (энинофосфер) и выбор параметров формирующих энинофосфер должны обеспечивать эти свойства и качество.

Понимая это, автор доклада, в частности, разработал теорию синтеза незвольвентных зубчатых зацеплений в обобщающих параметрах. Ее применение позволило, в частности, оптимизировать геометрические и кинематические показатели качества цилиндрических зацеплений планетарных редукторов в электромеханических приводах космических аппаратов нового поколения. Приводы с такими зацеплениями обладают низкой энергоемкостью и имеют ресурс работы

в 5 раз больше, чем существующие приводы, используемые, в частности, для высокоточного движения объектов космической техники.

И далее, идя от частного к общему, автор сформулировал следующие общие этапы синтеза различных систем (творения циклов): 1) определение обобщенной (предельной) области существования цикла взаимодействующих энинфосфер системы из условий предельных ограничений формы их элементов вне зависимости от масштаба; 2) поиск определяющей точки локальной области существования цикла с оптимальными качественными показателями для заданных условий «жизни» системы путем изменения значений ее обобщающих параметров, формы элементов энинфосфер и обобщающих координат точки входа в цикл и (или) выхода из цикла; 3) определение параметров процесса формирования энинфосфер системы и формирующих их энинфосфер.

Циклическое мировоззрение включает понимание закона цикличности (колебательности) энинфосфер и закона их циклического взаимодействия внутри систем, а именно того факта, что любое взаимодействие происходит квантами, структура которых является циклической. Полуквант взаимодействия описывается равенством импульса силы и количества движения объекта по окружности как проекции спирали движения на плоскость. В соответствии с этим анализ систем должен включать следующие этапы: 1) установление взаимообусловленных полюсов цикла; 2) выявление противоположных сил в данном взаимодействии; 3) нахождение параметра, определяющего массу взаимодействующих энинфосфер и скорость процесса изменения сил; 4) исследование влияния на рассматриваемый цикл других циклов.

Учитывая, что развитие науки связано с постоянным повышением сложности и увеличением объема информации, применение ноосферно-циклической методологии синтеза и анализа систем в различных областях науки является объективной необходимостью. Эта методология, кроме всего прочего, вырабатывает у человека умение выделять из многообразия факторов те факторы, которые объективно определяют характерные точки будущего цикла, и вносить корректировки, способствующие гармонизации системы с учетом ее «генетических» особенностей.

**Ключевые слова:** *ноосферно-циклическая методология, синтез и анализ систем.*

## Noosphere-cyclical methodology of synthesis and analysis of systems

O.N. Tsukanov

Russian Academy of Natural Sciences, Moscow, Russia  
E-mail: tsonzz@mail.ru

The activity of noospheric consciousness, expanding to a cosmoplanetary scale and capable of perceiving an integral picture of the world, distinguishes people with noospheric thinking from people with ordinary thinking. And since a person creates in the system of cosmic cycles, then noospheric thinking is the basis of the noosphere-cyclical worldview in the process of creating cycles as creation of future.

Noospheric thinking is objectively aimed and at understanding, that in the process creation of future, the properties and quality of the synthesized systems should be in the first place, and process of forming them objects as energy information spheres (eninfospheres) and choice of parameters of forming eninfospheres should ensure these properties and quality.

Understanding this, the author of the report, in particular, developed the theory synthesis of non-involute gearings in generalizing parameters. Her application allowed, in particular, to optimize geometrical and kinematical indicators of quality of cylinderconical gearings of planetary gearboxes in the new generation electromechanical drives of spacecraft. Drives with such gearings have low energy consumption and a life of 5 times longer than existing drives ones, used, in particular, for high-precision movement of space technology objects.

And further, going from particular to general, the author of report formulated following general stages of synthesis of various systems (creation of cycles): 1) determination of the generalized (limiting) existence area of the cycle of interacting eninfospheres of the system from the conditions of limiting restrictions on the shape of their elements regardless of scale; 2) search for the defining point of the local area of existence of the cycle with optimal quality indicators for given conditions of "life" of the system by changing the values of its generalizing parameters, the shape of elements of eninfospheres and the generalizing coordinates of the entry point into the cycle and (or) exit from the cycle; 3) determination of parameters of the process of formation of eninfospheres of the system and forming them eninfospheres.

A cyclic worldview includes an understanding of the law of cyclicity (oscillation) of eninfospheres and the law of their cyclic interaction within systems, namely the fact that any interaction occurs quantay whose structure is cyclic. The interaction semi-quantum is described by the equality of a momentum of a force and a quantity of movement of an object by a circle as a projection of a spiral of movement onto a plane. In accordance

with this, the analysis of systems should include the following steps: 1) the establishment of interdependent poles of the cycle; 2) the identification of opposing forces in this interaction; 3) finding a parameter that determines the mass of interacting eninfospheres and the speed of the process of changing forces; 4) study of the influence of other cycles on the cycle under consideration.

Given that the development of science is associated with a constant increase in complexity and an increase in the amount of information, use noosphere-cyclical methodology of synthesis and analysis of systems in various fields of science is an objective necessity. This methodology, among other things, develops a person's ability to distinguish from a variety of factors those factors that objectively determine the characteristic points of the future cycle, and make adjustments that contribute to the harmonization of the system taking into account its 'genetic' features.

**Keywords:** *noosphere-cyclical methodology, synthesis and analysis of systems.*

## **Гидродинамика, акустика и энергетика импакта капли**

Ю.Д. Чашечкин

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

E-mail: yulidch@gmail.com

Интерес к изучению динамики и энергетике течений, возникающих при столкновении капель и падении в жидкость, сопутствующих гравитационных, капиллярных и звуковых волн, обусловлен научной содержательностью темы и устойчивым ростом числа практических приложений в различных разделах механики, в том числе в аэродинамике и ракетостроении. Согласованное теоретическое и лабораторное моделирование процессов осуществляется на основе системы фундаментальных уравнений переноса плотности, концентрации веществ, импульса и полной энергии, включающей замыкающие уравнения состояния для потенциала Гиббса и его производных — традиционных термодинамических величин, с физически обоснованными граничными и начальными условиями [1]. Система уравнений анализируется с учетом условия совместности, которое определяет ее ранг, степень линеаризованной версии и порядок характеристического (дисперсионного) уравнения. Приведена классификация структурных компонентов течений, включающая лигаменты — тонкие поверхности раздела или нити, волны и вихри. Экспериментальные методики и расчетные коды были разработаны с учетом собственных масштабов процессов. Эксперименты проводились на стендах гидрофизического комплекса для изучения динамики и тонкой структуры быстрых процессов [2].

Приведены результаты сравнения расчетов и лабораторных исследований динамики и геометрии течения при отрыве капли, колебаний оторвавшейся капли, геометрии каверны, венца и всплеска, разлета брызг, в том числе падающих на поверхность погружающейся капли. Визуализирована картина переноса вещества капли, сконцентрированного в тонких волокнах, образующих дискретную структуру на поверхности каверны и венца [3]. Капли, падающие в воду, вызывают генерацию звуковых пакетов, высокочастотных на начальном контакте и в акустическом диапазоне частот последующих осцилляций пузырьков газа [4]. Рекуррентная сверхтонкой структуры поверхности жидкости в области импакта капли показывает важную роль тонкого двойного слоя, состоящего из слившихся поверхностей жидкостей как несмешивающихся, так и несмешивающихся в динамике течения в формировании картины течений [5]. Обсуждаются технические приложения результатов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-19-00598).*

#### **Литература**

1. *Chashechkin Yu.D.* Singularly perturbed components of flows — linear precursors of shock waves // *Math. Model. Nat. Phenom.* 2018. Vol. 13. No. 2. Pp. 1–29.
2. Гидрофизический комплекс ИПМех РАН «ГФК ИПМех РАН». URL: <http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip>
3. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* Полосчатые структуры в картине распределения вещества капли по поверхности принимающей жидкости // *Доклады РАН.* 2018. Т. 481. № 2. С. 145–150. DOI: 10.31857/S086956520001192-4
4. *Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е.* Акустика и гидродинамика удара капли о водную поверхность // *Акустический журнал.* 2017. Т. 63. № 1. С. 38–49.
5. *Чашечкин Ю.Д.* Визуализация тонкой структуры возмущений поверхности жидкости течениями, вызванными упавшей каплей // *Прикладная математика и механика.* 2019. Т. 83, № 3. С. 403–412. DOI: 10.1134/S0032823519030032

## **Дифференциальная механика жидкостей — новое поколение самосогласованных и разрешимых моделей течений**

Ю.Д. Чашечкин

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия  
E-mail: [yulidch@gmail.com](mailto:yulidch@gmail.com)

Активное развитие вычислительных технологий позволяет проводить согласованные теоретические (аналитические и численные) и экспериментальные (лабораторные) исследования течений на основе системы фундаментальных уравнений неразрывности, переноса

импульса, компонентов вещества, полной энергии с учетом уравнений состояния для термодинамических потенциалов и их производных — традиционных физических параметров (плотности, температуры, давления) изучаемой среды, а также физически обоснованных граничных условий [1]. Масштабно- и параметрически инвариантная классификация структурных компонентов, основанная на результатах анализа свойств полных решений линеаризованной системы с учетом условия совместности, определяющего ранг нелинейной системы, порядок линейной версии и степени характеристического (дисперсионного) уравнения, включает тонкоструктурные лигаменты, внутренние волны и вихри. Требования к алгоритмам расчетов и методикам эксперимента, которые формулируются с учетом собственных пространственно-временных масштабов изучаемых компонентов, реализованы в программах численного моделирования течений, индуцированных диффузией на неподвижном препятствии в непрерывно стратифицированной жидкости, а также образующихся при вынужденном движении тел различной формы, как симметричных, так и несимметричных, установленных под произвольным углом к горизонту [2, 3]. Расчеты проведены в компьютерных центрах НИВЦ МГУ и НИЦ «Курчатовский институт».

Высокоразрешающий эксперимент, позволяющий визуализировать все компоненты картины обтекания препятствий — опережающие возмущения, лигаменты — тонкие прослойки и волокна, внутренние волны, вихри след, проследить зависимости их параметров от условий задачи, выполнен на стендах УИУ «ГФК ИПМех РАН» [4].

Подход допускает расширения, позволяющие учесть влияние картины течений на распределения химических компонентов в морских и речных течениях [5] и обратное влияние химических процессов на динамику и структуру среды, сформулировать требования адекватности и полноты методики расчетов. Одним из путей повышения точности морских измерений служит реализация принципа избыточности, основанного на использовании физически и инструментально независимых методов измерения базовых величин, в частности плотности среды, температуры, электропроводности, скорости звука.

## **Литература**

1. *Chashechkin Yu.D.* Differential fluid mechanics — harmonization of analytical, numerical and laboratory models of flows // *Mathematical Modeling and Optimization of Complex Structures. Springer Series “Computational Methods in Applied Sciences.”* Vol. 40. 2016. Pp. 61–91. DOI: 10.1007/978-3-319-23564-6-5
2. *Chashechkin Yu.D.* Singularly perturbed components of flows — linear precursors of shock waves // *Math. Model. Nat. Phenom.* 2018. Vol. 13. No. 2. Pp. 1–29. DOI: 10.1051/mmnp/2018020

3. *Димитриева Н.Ф., Чашечкин Ю.Д.* Тонкая структура стратифицированного течения около неподвижного и медленно движущегося клина // *Океанология*. 2018. Т. 58, № 3. С. 358–368. DOI: 10.7868/S0030157418030024
4. *Chashechkin Yu.D., Zagumennyi Ya.V.* Formation of waves, vortices and ligaments in 2D stratified flows around obstacles // *Physica Scripta*. 2019. Vol. 94. No. 5. Pp. 1–17. DOI: 10.1088/1402-4896/ab0066
5. *Чашечкин Ю.Д., Розенталь О.М.* Физическая природа неоднородности состава речных вод // *Доклады РАН*. 2019. Т. 485, № 2. С. 194–197. DOI: 10.1134/S1028334X19020107

## Об одной нелинейной задаче оптимальной встречи

О.Ю. Черкасов, Э.И. Макиева

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
E-mail: oyuche@yandex.ru; elinamakieva@live.com

В работе рассматривается нелинейная постановка задачи оптимальной встречи двух игроков, представленных в качестве материальных точек. Движение точек происходит в горизонтальной плоскости с постоянными по модулю скоростями. Целью Игрока 1 является минимизация конечного расстояния до Игрока 2, который использует метод пропорционального наведения. Время процесса фиксировано. Начальное расстояние между точками ( $r_0$ ) и угол между вектором скорости Игрока 2 и линией визирования заданы, конечные условия свободны. В качестве управления принят угол между вектором скорости Игрока 1 и линией визирования.

С помощью принципа максимума Понтрягина задача оптимального управления сводится к краевой задаче для системы трех нелинейных дифференциальных уравнений. Сечением фазового пространства плоскостью  $r = \text{const}$  полученная система сводится к системе двух нелинейных дифференциальных уравнений для углов между векторами скорости игроков и линией визирования.

Проводятся качественный анализ краевой задачи, а также ее численное решение при различных значениях константы метода пропорционального наведения и различных соотношениях скоростей игроков. Исследованы характерные свойства траекторий, проведено сравнение результатов применения оптимальной стратегии с альтернативной — методом погони.

Представленная задача может быть актуальна, например, при планировании траекторий сближения самолета-заправщика с беспилотным летательным аппаратом, а также в случае перехвата атакующего беспилотного летательного аппарата ракетой-имитатором цели, запущенной с настоящей цели.

**Ключевые слова:** метод пропорционального наведения, принцип максимума Понтрягина.

## On a nonlinear optimal rendezvous problem

O. Cherkasov, E. Makieva

Lomonosow Moscow State University, Moscow, Russia  
E-mail: oyuche@yandex.ru; elinamakieva@live.com;

The optimal rendezvous problem of two players represented as material points moving in the horizontal plane is considered. The velocities of both players have a constant modulus. The goal of Player 1 is to minimize the final distance to Player 2, which uses the proportional navigation method. Process time is fixed. The initial distance between the points ( $r_0$ ) and the angle between the velocity vector of Player 2 and the line of sight are given, the final conditions are free. The angle between the velocity vector of Player 1 and the line of sight is considered as a control variable.

Using the Pontryagin maximum principle, the optimal control problem is reduced to a boundary value problem for a system of three nonlinear differential equations. Considering a section of the phase space of a dynamical system by plane  $r = const$ , the system reduces to a system of two nonlinear differential equations for the angles between velocity vectors of the players and the line of sight.

A qualitative analysis of the boundary value problem is carried out, as well as its numerical solution for various values of the constant of the proportional navigation method and various ratios of players' speeds. The characteristic properties of the trajectories are investigated, and the results of applying the optimal strategy and the alternative strategy — the chase method — are compared.

Presented problem may be relevant when planning the approach trajectories of a tanker aircraft with an unmanned aerial vehicle and also in case of interception of the attacking unmanned aerial vehicle by the simulator of the target launched from the real target.

**Keywords:** *proportional navigation method, Pontryagin maximum principle.*

## О структуре оптимальной тяги для «промежуточной» модели летательного аппарата

О.Ю. Черкасов, Н.В. Смирнова

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
E-mail: oyuche@yandex.ru, nina.smirnova247@yandex.ru

Рассматривается задача оптимизации траекторий движения объекта, представляемого материальной точкой, в однородном поле сил тяжести при наличии сопротивляющейся среды и силы тяги. Используется «промежуточная» модель летательного аппарата, в которой



предполагается, что изменение подъемной силы не приводит к изменению силы сопротивления, что фактически означает возможность управления углом наклона траектории. В качестве управления угол наклона траектории и сила тяги.

Существенным отличием от других работ по данной тематике является фиксированное значение конечной высоты.

Алгоритм решения задач заключался в применении принципа максимума Понтрягина для поиска экстремальных управлений, сведении задачи к краевой для переменных исходной системы (т. е. без сопряженных переменных) для дальнейшего аналитического и численного исследования.

Проведено качественное исследование решений краевой задачи. Найдено разбиение плоскости на участки для максимальной, минимальной и промежуточной тяги, построены фазовые портреты системы уравнений краевой задачи.

1. Доказано, что в случае линейного сопротивления оптимальная программа изменения тяги может состоять либо из трех участков: промежуточная — максимальная — промежуточная, либо из двух: максимальная — промежуточная, либо только из одного, соответствующего промежуточной, а в случае отсутствия сопротивления — из двух участков: максимальной и промежуточной.

2. Найдена зависимость параметра (значение сопряженной переменной, соответствующей высоте в конечный момент времени) от конечной высоты.

3. Все результаты проиллюстрированы с помощью пакета MATLAB.

В перспективе возможен следующий путь изучения задачи: исследование задачи при различных весовых коэффициентах в целевой функции и максимизация горизонтальной дальности для твердого тела.

**Ключевые слова:** брахистохрона, максимизация дальности, принцип максимума, краевая задача, оптимальная тяга.

## **On the structure of the optimal thrust for the ‘intermediate’ model of aircraft**

O.Yu. Cherkasov, N.V. Smirnova

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
E-mail: oyuche@yandex.ru, nina.smirnova247@yandex.ru

The problem of optimizing the trajectories of the object represented by a material point in a uniform field of gravity in the presence of a resisting medium and traction is considered. An “intermediate” model of the aircraft is used, in which it is assumed that a change in the lifting force does not lead to a change in the drag force, which in fact means the possibility

of controlling the angle of inclination of the path. As a control, the angle of inclination of the trajectory and traction force.

A significant difference from other works on this subject is a fixed value of the final height.

The algorithm for solving problems consisted in applying the Pontryagin maximum principle to search for extreme controls, reducing the problem to a boundary value for the variables of the original system (that is, without conjugate variables) for further analytical and numerical studies.

A qualitative study of the solutions of the boundary value problem is carried out. The division of the plane into sections for maximum, minimum and intermediate thrust is found, phase portraits of the system of equations of the boundary value problem are constructed.

(1) It is proved that in the case of linear resistance, the optimal program for changing traction can consist of either three sections: intermediate-maximum-intermediate, or two: maximum-intermediate, or only one corresponding to the intermediate, and in the absence of resistance from two sections — maximum and intermediate.

(2) The dependence of the parameter  $a$  (the value of the conjugate variable corresponding to the height at a finite point in time) on the final height is found.

(3) All results are illustrated using the MATLAB.

In future, the following way of studying the problem is possible: investigation of the problem at various weight coefficients in the objective function and maximization of the horizontal range for a solid.

**Keywords:** *brachistochron, range maximization, maximum principle, boundary value problem, optimal traction.*

## **Бафтинг элементов авиационных, аэрокосмических и ракетных конструкций**

С.Л. Чернышев<sup>1</sup>, И.И. Липатов<sup>1</sup>, В.Н. Бакулин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ЦАГИ, Жуковский, Россия

<sup>2</sup>Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия

E-mail: vbak@yandex.ru

Впервые построены физические и математические модели бафтинга элементов конструкций летательных аппаратов (ЛА), движущихся со сверхзвуковой скоростью. Проведено математическое моделирование обтекания высокоскоростным потоком вязкого газа и численное моделирование процессов возникновения бафтинга. На численных примерах впервые получены и представлены зависимости и исследовано влияние вида и величин нагрузок, а также пара-

метров конструкций ЛА на границы области неустойчивости. Показано, что использование упрощенных моделей может привести в расчетах области неустойчивости к большим, в том числе недопустимым погрешностям, что может повлечь разрушение ЛА. Разработанные модели значительно расширяют круг решаемых задач и позволяют провести расчет динамической устойчивости элементов конструкций ЛА различного назначения. Полученные результаты позволяют обоснованно подойти к решению проблемы весового совершенства конструкций ЛА, что говорит об актуальности рассмотренных задач.

**Ключевые слова:** бафтинг, летательные аппараты, элементы авиационных, аэрокосмических и ракетных конструкций.

## Buffeting of elements of aviation, aerospace and rocket structures

S.L. Chernyshev<sup>1</sup>, I.I. Lipatov.<sup>1</sup>, V.N. Bakulin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TsAGI, Zhukovsky town, Russia

<sup>2</sup>Institute of Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,  
E-mail: vbak@yandex.ru

For the first time, physical and mathematical models of the buffing of structural elements of aircraft (LA) moving at supersonic speeds were built. Mathematical modeling of the flow around a high-speed viscous gas stream and numerical simulation of the occurrence of buffering were carried out.

Using numerical examples, dependences were first obtained and presented, and the influence of the type and magnitude of the loads, as well as the parameters of the aircraft structures on the boundaries of the instability region, was investigated. It is shown that the use of simplified models can lead to large instabilities in the calculations of the instability region, including unacceptable errors, which may lead to the destruction of the aircraft. The developed models significantly expand the range of tasks and allow the calculation of the dynamic stability of structural elements of aircraft for various purposes. The results obtained will allow us to reasonably approach the solution of the problem of weighted perfection of aircraft structures, which indicates the relevance of the problems considered.

**Keywords:** buffeting, aircraft, elements of aviation, aerospace and rocket structures.

## Сергей Алексеевич Чаплыгин в Московском университете

В.Н. Чиненова

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
E-mail: v.chinenova@yandex.ru

В работе рассмотрены некоторые факты студенческой и преподавательской жизни С.А. Чаплыгина (1869–1942) в Московском университете, его руководство кафедрой механики. Показана роль научных работ С.А. Чаплыгина на формирование новой ветви механики непрерывной среды (газовой механики) и на дальнейшее развитие отечественной науки. Использованы архивные документы.

**Ключевые слова:** *Московский университет, С.А. Чаплыгин, высшее образование в России, газовая механика.*

## Sergey Alexeyevich Chaplygin at Moscow University

V.N. Chinenova

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
E-mail: v.chinenova@yandex.ru

The paper provides the biographical details of Sergey Alexeyevich Chaplygin (1869–1942). The student years of Sergei Chaplygin and beginning of his teaching activity, his leadership of the Department of mechanics are described. Chaplygin is the founder of a new branch of continuous medium mechanics; he also devised the general methods for gas mechanics. The role of scientific works of S.A. Chaplygin on the further development of domestic science is shown.

**Keywords:** *Moscow University, S. A. Chaplygin, higher education in Russia, gas mechanics.*

## Особенности организации международных олимпиад по теоретической механике

А.О. Шимановский, М.Г. Кузнецова, И.Е. Кракова

БелГУТ, Гомель, Беларусь  
E-mail: tm.belsut@gmail.com

Теоретическая механика — одна из фундаментальных дисциплин, знание которой определяет компетентность специалистов, занимающихся проектированием и эксплуатацией различных технических объектов, а также научной деятельностью, связанной с меха-

ником. Олимпиады обеспечивают развитие способностей студентов, предоставляют возможности по более глубокому усвоению материала, учат применению нестандартных методов решения задач.

Международные олимпиады по теоретической механике проводятся в Белорусском государственном университете транспорта начиная с 2005 года. Они стали логическим развитием Белорусских республиканских олимпиад, организатором которых до этого была Белорусская государственная политехническая академия (сейчас — БНТУ). В уже состоявшихся 15 международных олимпиадах приняли участие около 2 тыс. студентов и преподавателей из Беларуси, Израиля, Казахстана, Китая, России, Туркменистана, Украины, Польши, Швеции и других государств. В 2018 г. БелГУТом было подписано соглашение о передаче прав на проведение Азиатского этапа олимпиады Хохайскому университету (г. Нанкин, Китай). Впервые проведенный в январе 2019 г. такой конкурс собрал 308 студентов из 48 вузов, которые представляли материковую часть Китая и остров Тайвань. По ее результатам были отобраны участники заключительного тура олимпиады, который уже традиционно проводился в г. Гомеле (Республика Беларусь).

Олимпиада включает два конкурса: теоретический (лично-командный) и «Брейн-ринг» (командный). На теоретическом конкурсе участникам предлагают восемь задач (две по статике, две по кинематике и четыре по динамике), на решение которых отводится 4 часа. Итоги подводят в личном и командном зачете (по сумме баллов трех лучших представителей вуза). В конкурсе «Брейн-ринг» командам, состоящим из трех студентов, на 60 минут предлагаются тридцать сравнительно несложных мини-задач — по десять соответственно по статике, кинематике и динамике. При проверке работ каждый правильный ответ оценивается одним баллом (решения не рассматриваются). Команда-победитель определяется по количеству правильных ответов.

Все комплекты задач, предложенных для решения, подготовлены организаторами. Для теоретических конкурсов А.О. Шимановский составляет новые оригинальные задачи. Учитывая различия в программах курсов теоретической механики для разных специальностей в различных государствах, условия предполагали возможность решения с применением типовых методов механики, причем предпочтение отдавалось комплексным задачам, в которых наряду с типовой частью имелись элементы, требующие дополнительного анализа. В качестве примера могут служить задачи динамики материальной системы, в которых следовало учесть возможность качения тела по поверхности с проскальзыванием и без него.

Формат конкурса «Брейн-ринг», задания которого разрабатывались авторами вместе с иными сотрудниками кафедры технической

физики и теоретической механики БелГУТа, обусловил необходимость того, чтобы для наиболее рационального решения каждой задачи достаточно было выполнить небольшое число операций. В то же время благодаря большому количеству задач появилась возможность включения в задания вопросов из большинства разделов курса теоретической механики. Наряду с простыми типовыми задачами, которых должно быть не менее четверти от общего числа, потребовалось включать и достаточно сложные, чтобы можно было осуществить распределение команд по заданным местам.

В рамках олимпиад прошли научно-методические семинары, на которых состоялся обмен опытом организации учебно-методической и научной работы на кафедрах теоретической механики вузов разных государств, а также намечены пути дальнейшего сотрудничества.

**Ключевые слова:** *теоретическая механика, международная олимпиада, организация конкурсов, условия задач.*

## **Features of the international Engineering Mechanics contests organization**

A.O. Shimanovsky, M.G. Kuzniatsova, I.E. Krakava

Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

E-mail: tm.belsut@gmail.com

Engineering Mechanics is one of the fundamental disciplines; its knowledge determines the competence of specialists involved in the design and operation of various technical objects, as well as scientific activities related to mechanics. Contests provide the development of students' abilities, provide opportunities for deeper learning of the material and teach the use of non-standard methods for solving problems.

International Engineering Mechanics contests have been held at the Belarusian State University of Transport since 2005. They became the logical development of the Belarusian Republican Contests, which had been previously organized by the Belarusian State Polytechnic Academy (now BNTU). The already held 15 International contests were attended by about two thousand students and teachers from Belarus, Israel, Kazakhstan, China, Russia, Turkmenistan, Ukraine, Poland, Sweden and other countries. In 2018, BelsUT signed an agreement on the transfer of rights to host the Asian stage of the Contest to Hohai University (Nanjing, China). The first such competition was held in January 2019 and brought together 308 students from 48 universities representing mainland China and the island Taiwan. According to its results, there were selected the participants for the final stage of the Contest, which has been traditionally held in Gomel (Belarus).

The Contest includes two competitions: the theoretical (personal-team) one and the “Brain Ring” (the team competition). At the theoretical competition the participants are offered eight problems (two in statics, two in kinematics and four in dynamics), 4 hours are allotted for their solution. The results are summarized in the individual and team (by the sum of the points of the three best representatives of the university) classifications. In the “Brain Ring” competition, teams of three students are offered thirty relatively simple mini-problems for 60 minutes — ten in statics, kinematics and dynamics, respectively. At checking the work, each correct answer is evaluated by one point (the solutions are not considered). The winning team is determined by the number of correct answers.

All sets of proposed for solution problems were prepared by the organizers. Shimanovsky A.O. compiles new original problems for theoretical competition. Considering the differences in the programs of the engineering mechanics courses for different specialties in different countries, the problems suggested the possibility of solving them by standard methods of engineering mechanics, and the preference was given to the complex problems, in which, along with the standard part, there were elements requiring additional analysis. For example, the problems of the material system dynamics, in which one should take into account the possibility of rolling the body over the surface with and without slipping.

The format of the “Brain Ring” competition necessitated that for the most rational solution of each problem it was enough to perform a small number of operations, the problems were developed by the authors together with other employees of the Technical Physics and Engineering Mechanics Department of the BelSUT. At the same time, due to the large number of problems, it was possible to include tasks from the most parts of the engineering mechanics course. Along with simple typical tasks, which should be no less than a quarter of the total number, it was necessary to include complex ones so that it was possible to carry out the distribution of teams in the given result places.

In the framework of the contests, the scientific and methodological seminars were held, at which the exchange of experience in organizing educational, methodological and scientific work at the engineering mechanics departments of different countries’ universities took place, and ways of further cooperation were outlined.

**Keywords:** *engineering mechanics, international contest, organization of contests, problem tasks.*

## **Компьютерное моделирование динамики вагонов в среде MSC.ADAMS**

А.О. Шимановский<sup>1</sup>, П.А. Сахаров<sup>1</sup>, Д.М. Марченко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>БелГУТ, Гомель, Беларусь

<sup>2</sup>АО «НМЗ», Новозыбков, Россия

E-mail: tm.belsut@gmail.com

Общие вопросы, связанные с анализом движения вагонов в составе поезда, достаточно широко исследованы. Однако постоянно происходящее совершенствование конструкций железнодорожного подвижного состава требует выполнения расчетов, подтверждающих безопасность перевозок с новыми или модернизированными компонентами. При анализе динамики вагонов они моделируются системами твердых тел с большим числом степеней свободы и неголономными связями. Применение специального программного обеспечения, осуществляющего расчеты динамики систем тел, к числу которого относится MSC.ADAMS, позволяет в результате виртуального моделирования получить практически важные результаты.

Цель представленной работы — анализ влияния управляющих воздействий и особенностей нелинейностей связей между элементами конструкции на динамику вагонов и поезда в целом.

В среде программного комплекса MSC.ADAMS была создана модель полувагона на тележках 18–100, учитывающая боковую жесткость пружин подвески и контактные взаимодействия как между деталями тележки, так и с деформируемым железнодорожным путем. Для обеспечения адекватности получаемых результатов осуществлены подбор и верификация зависимостей коэффициентов жесткости, демпфирования, сил трения скольжения и покоя от относительных скоростей и перемещений элементов системы. Выполнена оценка эффективности внедрения буксового подвешивания для снижения ударных нагрузок при прохождении стыка рельсов на основе установления зависимостей максимальных сил от величины стыкового зазора, скорости движения и нагрузки на колесо. Предложена новая конструкция упругих связей букс с боковыми рамами тележки, позволяющая на 15...20 % снизить значения сил, обусловленных прохождением рельсового стыка.

Создана также виртуальная модель грузового поезда, вагоны в котором связаны автосцепками с поглощающими аппаратами разных видов. В ходе вычислительных экспериментов проведена оценка влияния жесткости и демпфирующей способности амортизаторов на величину продольных сил и их распределение по длине поезда при электродинамическом торможении. Результаты расчетов показали, что амплитуда колебаний продольных сил в поезде при электриче-



ском торможении однородного состава на прямом участке пути зависит не столько от силовой характеристики поглощающих аппаратов, сколько от скорости изменения тормозной силы. Минимально возможные силы возникают в том случае, когда длительность увеличения тормозной силы равна периоду собственных колебаний поезда как упругой системы (при линейных силовых характеристиках поглощающих аппаратов). Подтверждено, что при электродинамическом торможении постановка порожних вагонов в голову неоднородного поезда может приводить к их сходу.

Полученные результаты могут быть использованы как для усовершенствования конструкций тележек вагонов, так и при формировании поездов и установлении рациональных режимов их ведения.

**Ключевые слова:** железнодорожный вагон, тележка, компьютерное моделирование, MSC.ADAMS, нелинейные колебания, динамика поезда.

## Computer simulation of the railway cars dynamics in the MSC.ADAMS software

A.O. Shimanovsky<sup>1</sup>, P.A. Sakharau<sup>1</sup>, D.M. Marchenko<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

<sup>2</sup> JSC Novozybkov Machine-Building Plant, Novozybkov, Russia

E-mail: tm.belsut@gmail.com

General issues related to the analysis of the movement of cars in a train are widely investigated. However, the ongoing improvement of the railway rolling stock designs requires calculations that confirm the transportation safety using new or modernized components. At the analysis of the cars dynamics, they are modeled by systems of solids with a large number of degrees of freedom and nonholonomic constraints. The use of special software that calculates the body systems dynamics, including MSC.ADAMS, allows to obtain practically important virtual results.

The purpose of the present work is to analyze the influence of control actions and especially non-linearities of the relationships between the structural elements on the dynamics of cars and the train as a whole.

In the MSC.ADAMS software package environment, a model of an open wagon car mounted on the 18-100 bogies was created, taking into account the lateral stiffness of the suspension springs and contact interactions both between the bogie parts and the deformable railway. To ensure the adequacy of the obtained results, the selection and verification of the dependences of the stiffness, damping, sliding friction and rest forces on the relative velocities and displacements of the system elements were carried out. The effectiveness axle box suspension usage for reducing the shock loads at passing through the rails' joint is estimated on the basis of establishing the dependences of the maximal forces on the size of the joint

gap, motion velocity and the wheel load. A new design of the elastic connectors of the axle boxes with the bogie side frames is proposed, and it allows to reduce the forces caused by passing through the rail joint by 15...20%.

A virtual model of a freight train is also created, the cars in it are connected by auto-couplers with damping devices of various types. During computational experiments, the influence of the stiffness and damping ability of shock absorbers on the longitudinal forces and their distribution along the length of the train at its electrodynamic braking was evaluated. The computational results showed that the longitudinal forces oscillations amplitude for the homogeneous train at its electrical dynamic braking on a straight track section not significantly depends on the power characteristics of the absorbing devices but mostly depends on the braking force change rate. The minimal possible forces arise in the case when the braking force increase duration is equal to the period of natural oscillations of the train as an elastic system (with linear power characteristics of absorbing devices). It was confirmed that at the electrodynamic braking, placing empty cars in the inhomogeneous train head can lead to their descent.

The results can be used both to improve the design of wagon bogies, and at forming trains and establishing rational modes of their driving.

**Keywords:** *railway carriage, bogie, computer simulation, MSC.ADAMS, nonlinear vibrations, train dynamics.*

## **Примеры теорий со старшими производными**

А.О. Шишанин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: shishandr@rambler.ru

В XIX в. Гамильтон и Остроградский начали изучать механические системы со старшими временными производными. Хорошо известно, что в таких моделях имеются сложности. Например, в квантово-механическом осцилляторе Пайса — Уленбека с кратными частотами спектр неограничен снизу и каждое состояние бесконечно вырождено. Также интересными свойствами обладают модели теории поля. Мы обсудим некоторые примеры моделей со старшими производными в классической и квантовой механиках, а также в теории поля.

**Ключевые слова:** *гамильтониан, лагранжиан, осциллятор Пайса — Уленбека.*

## Examples of theories with higher derivatives

A.O. Shishanin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: shishandr@rambler.ru

In the 19th century, Hamilton and Ostrogradsky began to study mechanical systems with higher time derivatives. It is well-known that such models have some problems. For instance in quantum mechanics the Pais — Uhlenbeck oscillator with multiple frequencies has the unbounded spectrum but each level is infinitely degenerate. Field theory models also have interesting properties. We will discuss some examples of models with higher derivatives in classical mechanics, quantum mechanics and field theory.

**Keywords:** *the Hamiltonian, the Lagrangian, Pais — Uhlenbeck oscillator.*

## Фронтоник и академик (к 100-летию со дня рождения академика К.С. Колесникова)

П.М. Шкапов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: spm@bmstu.ru

В докладе приводится краткая информация об основных этапах жизни и деятельности академика Константина Сергеевича Колесникова и созданной им научно-педагогической школы в области исследования динамики и прочности машин, преподавания механики в МВТУ им. Н.Э. Баумана [1, 2].

**Ключевые слова:** *Колесников Константин Сергеевич, МВТУ им. Н.Э. Баумана, динамика и прочность машин, теоретическая механика, ракетно-космическая техника, научно-педагогическая школа.*

### Литература

1. Шкапов П.М. Фронтоник и академик (к 100-летию академика К.С. Колесникова) // Машиностроение и компьютерные технологии. 2019; (7):13-25. <https://www.technomagelpub.ru/jour/article/view/1508>; <https://doi.org/10.24108/0719.0001508>
2. Фронтоник и академик. Воспоминания о К.С. Колесникове / сост. А.В. Емельянов, Е.И. Емельянова. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019.

## War veteran and academician (the centenary of academician K.S. Kolesnikov)

P.M. Shkapov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: spm@bmstu.ru

The article presents brief information on the main stages of the life and work of academician Konstantin Sergeyeovich Kolesnikov, and his scientific and educational school created at Bauman Moscow Higher Technical School (BMHTS) to study dynamics and strength of machines and teach mechanics [1].

**Keywords:** *Konstantin Sergeyeovich Kolesnikov, BMSTU, dynamics and strength of machines, theoretical mechanics, rocket and space technology, scientific and educational school.*

### References

1. Shkapov P.M. War Veteran and Academician (The centenary of academician K.S. Kolesnikov). *Mechanical Engineering and Computer Science*, 2019; (12):1–12. <https://doi.org/10.24108/1219.0001509>
2. *Frontovik i akademik. Vospominaniya o K.S. Kolesnikove* [Front-line worker and academician. Memoirs of K.S. Kolesnikov]. Comp by A.V. Yemelyanov, Ye.I. Yemelyanova. Moscow, BMSTU Publ., 2019. (In Russ.).

## О постановке и решении задач гидродинамики в трудах академика К.С. Колесникова и его учеников

П.М. Шкапов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: spm@bmstu.ru

Начиная с 1960-х годов в МВТУ им. Н.Э. Баумана с приходом на кафедру теоретической механики К.С. Колесникова значительная часть исследований его формирующейся научной школы стала связана с потребностями бурно развивающейся ракетно-космической техники. Стали разрабатываться такие научные направления, как динамика ракет с жидкостными ракетными двигательными установками (ЖРДУ) большой мощности, включая задачи продольных и поперечных колебания конструкции с учетом динамики жидкости в баках. Исследовались устойчивость и автоколебания систем управления движением, а также систем топливоподачи, в том числе с учетом двухфазности потока в гидролиниях и кавитации в шнекоцентробежных насосах [1–3].

Отправной точкой проводимых исследований по динамике систем управления и топливоподачи ЖРДУ была привязка к реальным изделиям, а также экспериментальное выявление механизмов динамических процессов, опирающееся на вскрытие структуры течений в составных элементах гидросистем. Это позволило разработать математические модели объектов исследования, выявлять и прогнозировать их поведение в широком диапазоне изменения режимных параметров работы, оптимизировать динамические характеристики изделий по многим критериям качества. В дальнейшем эти наработки были применены к изделиям и системам из других областей техники и промышленности.

**Ключевые слова:** ракетно-космическая техника, гидродинамика, двухфазные течения, кавитация, математическое моделирование, колебания, оптимизация глобальная.

### Литература

1. Колесников К.С., Пожалостин А.А., Шкапов П.М. Задачи динамики гидромеханических систем в трудах кафедры теоретической механики имени профессора Н.Е. Жуковского // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. Вып. 7. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2012-7-285>
2. Шкапов П.М., Карпачев А.Ю. Основные направления научной работы кафедры теоретической механики имени профессора Н.Е. Жуковского // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 12 (24). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-12-1131>
3. Шкапов П.М. Фронтоник и академик (к 100-летию академика К.С. Колесникова) // Машиностроение и компьютерные технологии. 2019; (7):13-25. <https://doi.org/10.24108/0719.0001508>

## On the formulation and solution of problems of the gidrodynamics in the works of academician Konstantin Sergeevich Kolesnikov and his associates

P.M. Shkapov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: [spm@bmstu.ru](mailto:spm@bmstu.ru)

Since the 1960s with the arrival of K.S. Kolesnikov to the Department of Theoretical Mechanics at Bauman Moscow Higher Technical School, a significant part of the research of his emerging scientific school had become associated with the needs of rapidly developing rocket and space technology. Such scientific directions as dynamics of rockets with liquid rocket propulsion systems (lreds) of high power, including problems of longitudinal and transverse oscillations of a design taking into account dynamics of a liquid in tanks began to be developed. We studied the stability and self-oscillations of motion control systems, as well as fuel supply sys-

tems, including taking into account the two-phase flow in hydraulic lines and cavitation in screw centrifugal pumps [1–3].

The starting point of the ongoing research on the dynamics of control systems and fuel supply of liquid propellant rocket engines was binding to real products, as well as experimental identification of the mechanisms of dynamic processes, based on opening the structure of flows in the constituent elements of hydraulic systems. This allowed us to develop mathematical models of the objects of study, to identify and predict their behavior in a wide range of operating regime parameters, to optimize the dynamic characteristics of products according to many quality criteria. Subsequently, these developments were applied to products and systems from other areas of technology and industry.

**Keywords:** *space rocket technology, hydrodynamics, two-phase flows, cavitation, mathematical modeling, oscillations, global optimization.*

### References

1. Kolesnikov K.S., Pozhalostin A.A., Shkapov P.M. Problems of Hydromechanical Systems Dynamics in Proceedings of the Zhukovsky Theoretical Mechanics Department. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, iss. 7 (7). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2012-7-285>
2. Shkapov P.M., Karpachev A.Yu. Research work of the Department of Theoretical Mechanics named after Professor N.E. Zhukovsky. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, iss. 12 (24). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-12-1131>
3. Shkapov P.M. War Veteran and Academician (The centenary of academician K.S. Kolesnikov). *Mechanical Engineering and Computer Science*. 2019; (12):1–12. <https://doi.org/10.24108/1219.0001509>  
<https://www.techomagelpub.ru/jour/article/view/1509/1286>

## Просветительская деятельность как неотъемлемая часть преподавательского процесса

П.М. Шкапов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: [spm@bmstu.ru](mailto:spm@bmstu.ru)

В докладе на примере кафедры «Теоретическая механика» имени профессора Н.Е. Жуковского показано, что просветительская деятельность является в целом неотъемлемой частью преподавательского процесса и имеет многогранное воплощение. Кафедра теоретической механики Императорского Московского технического училища была создана Н.Е. Жуковским в 1878 г. Великий русский ученый являлся основателем целого ряда научных и научно-педагогических школ в высших учебных заведениях России, прежде всего в Высшем техническом училище и Московском университете. Отличительной

особенностью их являлась направленность на вовлечение в совместную научную работу по самой актуальной тематике преподавателей, инженеров и студентов. Формирование таких коллективов, кафедр, развитие новых учебных дисциплин и учебных планов имело самое положительное влияние на развитие высшего образования во всей России. Жуковский руководил кафедрой теоретической механики, составлял учебные планы, читал лекции и вел практические занятия в течение 43 лет своей жизни до 1921 г. На кафедре в разное время работали многие известные ученые и педагоги: С.А. Чаплыгин, А.И. Некрасов, А.П. Котельников, В.П. Ветчинкин, А.А. Космодемьянский, В.Н. Веселовский, К.С. Колесников и многие другие. Сама история становления и развития научно-педагогической школы кафедры составляет основу для ведения просветительской деятельности как в среде обучающихся, так и коллег-механиков из университетов и академических институтов.

В рамках этой работы при поддержке руководства университета и Научно-методического совета по теоретической механике при Минобрнауки РФ кафедра под руководством заведующего активно участвует в различных мероприятиях: научных конференциях, научно-методических семинарах, совещаниях заведующих кафедрами и ведущих преподавателей теоретической механики, съездах механиков. Публикуется значительное количество статей в периодической печати и целевых научно-методических сборниках. Значительная часть материалов вывешивается для свободного доступа в сети Интернет.

На данном этапе реформирования высшего образования России все это приобретает особое значение, так как МГТУ им. Н.Э. Баумана является флагманом высшего технического образования страны, а теоретическая механика является одной из базовых фундаментальных основ этого образования. Это накладывает особую ответственность на кафедру теоретической механики имени профессора Н.Е. Жуковского, которая достойно выполняет свою миссию по консолидации профессионального сообщества преподавателей высшей школы и доведения его мнения до общественности России.

**Ключевые слова:** Николай Егорович Жуковский, Императорское Московское техническое училище, МВТУ им. Н.Э. Баумана, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Московский государственный университет, научно-педагогическая школа, теоретическая механика, динамика и прочность машин, ракетно-космическая техника, просветительская деятельность.

## **Educational activity as an integral part of the teaching process**

P.M. Shkapov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
E-mail: spm@bmstu.ru

On the example of the Department of Theoretical Mechanics named after Professor N.E. Zhukovsky the report shows that enlightenment as a whole is an integral part of the teaching process and has a multifaceted embodiment.

**Keywords:** *Nikolai Egorovich Zhukovsky, Imperial Moscow Technical School, MHTS n.a. N.E. Bauman, Bauman Moscow State Technical University, Moscow State University, scientific and pedagogical school, theoretical mechanics, dynamics and strength of machines, rocket and space technology, educational activities.*