



**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ**

**MATHEMATICAL  
MODELLING**

II МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
II INTERNATIONAL CONFERENCE

**ТЕЗИСЫ  
ABSTRACTS**



МОСКВА, МАИ  
MOSCOW, MAI

**2021**

**II Международная конференция  
«Математическое моделирование»**

**II International Conference  
“Mathematical Modelling”  
(AviaSpace-2021)**

**Тезисы  
Abstracts**

Москва, МАИ  
21-22 июля 2021 г.

Moscow, MAI  
21-22 July 2021

УДК 004.94  
ББК 87.256.631.0я43  
С23

II Международная конференция «Математическое моделирование». 21-22 июля 2021 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2021. – 1,54 Мбайт. [Электронное издание].

II International Conference “Mathematical Modelling” (AviaSpace-2021). 21-22 July 2021. Moscow. Abstracts. – Publishing house “Pero”, 2021. – 1,54 MB. [Electronic edition]

ISBN 978-5-00189-367-7

В сборник включены доклады, представленные в Организационный комитет конференции в электронном виде.

Abstracts, which were sent to Organizing Committee in electronic form, are included in the digest.

ISBN 978-5-00189-367-7

© Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет), 2021

© Moscow Aviation Institute  
(National Research University), 2021

**Организатор**  
Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)

**Организационный комитет**

**Шемяков А.О.**, проректор по стратегическому развитию, председатель  
**Zhaohui Wu**, президент Чжэцзянского Университета

**Петер Руссер**, профессор Технического университета Мюнхена

**Дин Вучинич**, профессор Брюссельского свободного университета

**Замковой А.А.**, начальник управления научных программ  
и проектов МАИ

**Ефремов А.В.**, заведующий кафедрой «Динамика и управление полётом  
пилотируемых ЛА» МАИ – руководитель направления «Авиационные  
системы»

**Монахова В.П.**, директор дирекции института № 2 «Авиационные,  
ракетные двигатели и энергетические установки» МАИ – руководитель  
направления «Авиационные, ракетные двигатели и энергетические  
установки»

**Следков Ю.Г.**, директор дирекции института № 3 «Системы управления,  
информатика и электроэнергетика» МАИ – руководитель направления  
«Системы управления, информатика и электроэнергетика»

**Кирдяшкин В.В.**, директор дирекции института № 4 «Радиоэлектроника,  
инфокоммуникации и информационная безопасность» МАИ –  
руководитель направления «Информационно-телекоммуникационные  
технологии авиационных, ракетных и космических систем»

**Алифанов О.М.**, заведующий кафедрой «Космические системы  
и ракетостроение» МАИ – руководитель направления «Ракетные  
и космические системы»

**Кривилёв А.В.**, директор дирекции института № 7 «Робототехнические  
и интеллектуальные системы» МАИ – руководитель направления  
«Робототехника, интеллектуальные системы и авиационное вооружение»

**Крылов С.С.**, директор дирекции института № 8 «Информационные  
технологии и прикладная математика» МАИ – руководитель направления  
«Математические методы в аэрокосмической науке и технике»

**Беспалов А.В.**, директор дирекции института № 11 «Материаловедения  
и технологий материалов» МАИ – руководитель направления «Новые  
материалы и производственные технологии в области авиационной  
и ракетно-космической техники»

**Новиков С.В.**, директор дирекции института № 5 «Инженерная  
экономика и гуманитарные науки» МАИ – руководитель направления  
«Экономика и менеджмент предприятий аэрокосмического комплекса»

**Булакина М.Б.**, директор IT-центра МАИ

**Яковлева А.В.**, руководитель проректор Дирекции космических программ  
МАИ

**Калягин М.Ю.**, заместитель директора Центра БПЛА МАИ  
**Назаров Е.В.**, начальник лаборатории №2 НИО-101 МАИ

**Организационная группа**

**Шемяков А.О.**, проректор по стратегическому развитию МАИ

**Булакина М.Б.**, директор IT-центра МАИ

**Кондаратцев В.Л.**, ассистент кафедры «Вычислительная математика и программирование» МАИ

**Лунёва Н.С.**, заместитель начальника отдела по связям с общественностью МАИ

**Москаленко О.А.**, доцент кафедры «Вычислительная математика и программирование» МАИ

**Ухов П.А.**, заместитель директора IT-центра МАИ

**Февральских А.В.**, с.н.с. НИО-101 МАИ

## Программный комитет

- Равикович Ю.А.**, проректор по научной работе, председатель  
**Zhaohui Wu**, президент Чжэцзянского Университета
- Петер Руссер**, профессор Технического университета Мюнхена  
**Дин Вучинич**, профессор Брюссельского свободного университета  
**Медведский А.Л.**, первый заместитель генерального директора  
ФГУП «ЦАГИ»
- Терентьев В.В.**, начальник научно-организационного  
управления МАИ
- Веремеенко К.К.**, начальник научно-исследовательского отделения  
института № 3 «Системы управления, информатика и электроэнергетика»  
МАИ
- Грушин И.А.**, заместитель директора по научной работе института № 11  
«Материаловедения и технологий материалов» МАИ
- Долгов О.С.**, директор дирекции института № 1  
«Авиационная техника» МАИ
- Заговорчев В.А.**, начальник научно-исследовательского отделения  
института № 6 «Аэрокосмический» МАИ
- Зубанова С.Г.**, профессор кафедры И-11 «Иностранный язык  
для аэрокосмических специальностей» МАИ
- Ионов А.В.**, заместитель директора института № 2 «Авиационные,  
ракетные двигатели и энергетические установки» МАИ
- Кирдяшкин В.В.**, директор дирекции института № 4 «Радиоэлектроника,  
инфокоммуникации и информационная безопасность» МАИ
- Кириллов А.А.**, начальник научно-исследовательского отделения  
института № 7 «Робототехнические и интеллектуальные системы» МАИ
- Крылов С.С.**, директор дирекции института № 8 «Информационные  
технологии и прикладная математика» МАИ
- Силуянова М.В.**, профессор кафедры «Технология производства  
и эксплуатации двигателей летательных аппаратов» МАИ
- Тихонов Г.В.**, начальник научно-исследовательского отделения  
института № 5 «Инженерная экономика и гуманитарные науки»
- Стрелец М.Ю.**, начальник НИО-101 МАИ
- Яковлева А.В.**, руководитель проектов Дирекции космических  
программ МАИ
- Калягин М.Ю.**, заместитель директора Центра БПЛА МАИ
- Назаров Е.В.**, начальник лаборатории №2 НИО-101 МАИ

## **Organizer**

Moscow Aviation Institute (National Research University)

### **Organizing Committee**

**Aleksander Shemiakov**, Chairman of the Organizing Committee, Vice-rector for strategy development, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Zhaohui Wu**, Co-chairman of the Organizing Committee, President, Zhejiang University, Zhejiang, China

**Peter Russer**, Co-chairman of the Organizing Committee, professor, Technical University of Munich, Munich, Germany

**Dean Vučinić**, Co-chairman of the Organizing Committee, professor, Vrije University Brussel, Brussel, Belgium

**Andrey Zamkovoy**, Head of the MAI Scientific Programs and Projects Department, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Aleksandr Efremov**, Head of the MAI department 106 “Dynamics and Flight Control of Manned Aircraft”, Head of direction “Aviation Systems”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Veronika Monakhova**, Director of the MAI Institute No. 2 “Power Installations of Aviation, Rocket and Space Systems”, Head of direction “Power Installations of Aviation, Rocket and Space Systems”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Yury Sledkov**, Director of the MAI Institute No. 3 “Control Systems, Informatics and Power Generation”, Head of direction “Control Measuring and Computing Systems and Complexes and Onboard Power Generation”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Vladimir Kirdyashkin**, Director of the MAI Institute No. 4 “Radioelectronics, Infocommunications and Information Security”, Head of direction “Information and Telecommunication Technologies of Aviation, Rocket and Space Systems”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Oleg Alifanov**, Head of the MAI department 601 “Space Systems and Rocket Engineering”, Head of direction “Rocket and Space Systems”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Aleksander Krivilev**, Director of the MAI Institute No. 7 “Robotics and Intelligent Systems”, Head of direction “Robotics, Intelligent Systems and Aircraft Armament”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Sergey Krylov**, Director of the MAI Institute No. 8 “Information Technology and Applied Mathematics”, Head of direction “Mathematical Methods in Aerospace Science and Technology”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Alexander Bespalov**, Director of the MAI Institute No. 11 “Material Science and Technology”, Head of direction “New Materials and Production Technologies in the Areas of Aviation, Rocket and Space Technique”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Sergey Novikov**, Director of the MAI Institute No. 5 “Business Engineering and Humanities”, Head of direction “Economics and Management at Enterprises of Aerospace Complexes”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Maria Bulakina**, Head of MAI IT-center, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia  
Anna Yakovleva, Head of the projects at MAI Space Programs Direction, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Maksim Kalyagin**, Deputy Head of MAI UAV-center, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Egor Nazarov**, Head of the Lab 2 of the MAI Research Department 101, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

### **Organizational Group**

**Aleksander Shemiakov**, MAI Vice-rector for strategy development

**Maria Bulakina**, Head of MAI IT-center

**Kondaratsev Vadim**, assistant of the MAI Department “Computational Mathematics and Programming”

**Luneva Nadezhda**, Deputy head of MAI PR-Department

**Moscalenko Olga**, associate professor of the MAI Department “Computational Mathematics and Programming”

**Ykhov Petr**, Deputy head of MAI IT-center

**Fevral’skikh Andrey**, senior research fellow of the MAI Research Department 101

## **Program Committee**

**Yury Ravikovich**, Chairman of the Program Committee, Vice-rector for scientific affairs, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Zhaohui Wu**, Co-chairman of the Program Committee, President, Zhejiang University, Zhejiang, China

**Peter Russer**, Co-chairman of the Program Committee, professor, Technical University of Munich, Munich, Germany

**Dean Vučinić**, Co-chairman of the Program Committee, professor, Vrije University Brussel, Brussel, Belgium

**Aleksandr Medvedsky**, Deputy Head of Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovsky, Russia

**Vadim Terentyev**, Head of the MAI Scientific and Organizational Department, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Oleg Dolgov**, Director of the MAI Institute No. 1 “Aircraft Engineering”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Ivan Grushin**, Deputy Director for Scientific Affairs of the MAI Institute No. 11 “Material Science and Technology”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Aleksey Ionov**, Deputy Director of the MAI Institute No. 2 “Aviation, Rocket Engines and Power Installation”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Konstantin Veremeenko**, Head of the Research Department of the MAI Institute No. 3 “Control Measuring and Computing Systems and Complexes and Onboard Power Generation”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Vladimir Kirdyashkin**, Director of the MAI Institute No. 4 “Radioelectronics, Infocommunications and Information Security”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Vladimir Zagovorchev**, Head of the Research Department of the MAI Institute No. 6 “Aerospace Engineering”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Alexey Kirillov**, Head of the Research Department of the MAI Institute No. 7 “Robotic and Intelligent Systems”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Sergey Krylov**, Director of the MAI Institute No. 8 “Information Technologies and Applied Mathematics”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Marina Siluyanova**, Professor of the MAI Department “Production Technology and Exploitation of Aircraft Engines”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Gennady Tikhonov**, Head of the Research Department of the MAI Institute No. 5 “Business Engineering and Humanities”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Svetlana Zubanova**, Professor of the MAI Department I-11 “Foreign Language for Aerospace Specialties”, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Mikhail Strelets**, Head of the MAI Research Department 101, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Anna Yakovleva**, Head of the projects at MAI Space Programs Direction,  
Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

**Maksim Kalyagin**, Deputy Head of MAI UAV-center, Moscow Aviation  
Institute, Moscow, Russia

**Egor Nazarov**, Head of the Lab 2 of the MAI Research Department 101,  
Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

## Оглавление

<b>СЕКЦИЯ «АСПИРАНТЫ И ИССЛЕДОВАТЕЛИ»</b>	
<b>Трек 1 .....</b>	<b>12</b>
<b>Трек 2 .....</b>	<b>31</b>
<b>СЕКЦИЯ №1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ .....</b>	<b>55</b>
<b>СЕКЦИЯ №2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ .....</b>	<b>86</b>
<b>АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ .....</b>	<b>122</b>

## Contents

<b>SECTION "PH.D. STUDENTS AND RESEARCHERS"</b>	
<b>TRACK No.1 .....</b>	<b>12</b>
<b>TRACK No.2 .....</b>	<b>31</b>
<b>SECTION No.1. MATHEMATICAL MODELLING AND DIGITAL TWINS .....</b>	<b>55</b>
<b>SECTION No.2. MATHEMATICAL MODELLING OF PHYSICAL PROCESSES AND PHENOMENA .....</b>	<b>86</b>
<b>INDEX .....</b>	<b>124</b>

# Секция «Аспиранты и исследователи».

## Трек 1

### Section «Ph.D. Students and Researchers».

#### Track No.1

#### Исследование влияния степени перфорации стенок рабочей части на точность эксперимента на базе 2D CFD модели аэродинамической трубы

Бунтов М.Ю., Макеев П.В., Игнаткин Ю.М.

МАИ, г. Москва, Россия

В настоящее время развитие методов CFD (computational fluid dynamics) позволяет дополнять экспериментальные исследования задач аэродинамики численным моделированием с применением математических моделей аэродинамических труб (АДТ). CFD методы успешно применяются для моделирования течения в дозвуковых и сверхзвуковых АДТ. Это направление находит широкое применение при создании авиационной техники, в задачах промышленной аэродинамики, а также при создании самих АДТ.

Размеры рабочей части большинства АДТ существенно ограничены. С ростом скоростей (от дозвуковых к сверхзвуковым) сечение рабочей части АДТ значительно уменьшается. Одной из распространенных проблем при проведении экспериментов в АДТ является эффект «запирания», наблюдающийся при значительном перекрытии рабочей части АДТ исследуемой моделью. В частности, эффект «запирания» может значительно затруднять исследование аэродинамических характеристик (АХ) профилей, которые обычно получают на основе продувок модели отсека крыла. Это связано с тем, что при больших углах атаки  $\alpha$  модели область повышенного давления перекрывает сечение рабочей части АДТ, искажая условия обтекания. Для устранения «запирания» обычно применяется перфорация стенок рабочей части АДТ. При этом актуальным и практически значимым вопросом является исследование влияния степени (процента) перфорации стенок АДТ на точность результатов эксперимента.

В представленной работе на базе специально разработанной CFD модели АДТ в 2D-постановке, на базе метода URANS, исследуются стационарные АХ профиля SC1095 в широком диапазоне углов атаки  $\alpha = 0..28^\circ$ . Разработанная 2D CFD модель отличается низкой ресурсоемкостью и позволяет моделировать как стационарные, так и нестационарные АХ профиля в присутствии рабочего тракта АДТ. В исследовании рассмотрены три варианта перфорации стенок АДТ: 0% (без перфорации), 7.5% и 15%. Полученные данные сопоставляются с АХ профиля полученными в свободном потоке. В результате проведенных исследований сделаны выводы о влиянии степени перфорации стенок АДТ на АХ профиля на различных углах атаки от 0 до 28 градусов. Установлено, что при  $\alpha < 15^\circ$  модель АДТ (0% перфорация) не оказывает влияния на получаемые АХ профиля. При  $\alpha > 15^\circ$  наблюдаются искажения АХ профиля, увеличивающиеся с ростом угла  $\alpha$ . При  $15^\circ < \alpha < 20^\circ$  для исключения влияния АДТ требуется перфорация 7.5%, а при  $20^\circ < \alpha < 28^\circ$  перфорация 15%.

Таким образом, разработанная 2D CFD модель позволяет определять оптимальные для различных режимов испытаний соотношения степени перфорации стенок АДТ, размеров сечения рабочей части АДТ и размеров модели.

Литература:

1. Oleg E. Kirillov, Ruslan M. Mirgazov, Mikhail Yu. Buntov, Yuri M. Ignatkin, Sergey G. Konstantinov. Development of the Wind Tunnel CFD Model for Clarifying Rotor Blade Airfoil Unsteady Aerodynamic Researches. TEM Journal, 10(2), 554-562. DOI: 10.18421/TEM102-10

## **Numerical modeling of the walls perforation influence on the accuracy of wind tunnel experiments using 2D CFD model**

Buntov M.Y., Makeev P.V., Ignatkin Yu.M.

MAI, Moscow, Russia

Currently, the development of CFD (computational fluid dynamics) methods makes it possible to supplement experimental studies of various problems of aerodynamics with numerical modeling using mathematical models of Wind Tunnels (WT). The CFD methods are successfully used to model the flow in subsonic, transonic and supersonic WTs. This branch of science is involved in the development of aircraft, in the problems of industrial aerodynamics, as well as in the designing of the WTs itself.

The size of the working section of most WTs is significantly limited. With increasing speeds (from subsonic to supersonic), the cross section of the working section of the WT significantly decreases. One of the typical problems when conducting experiments in WT is the "locking" effect, which is observed when the working section of the WT is significantly overlapped by the model under study. In particular, the "locking" effect can significantly complicate the study of the aerodynamic characteristics of the airfoils, which are usually obtained through experiments on the wing section model. This is due to the fact that at large pitch angles  $\alpha$ , the area of increased pressure overlaps the cross-section of the WT working section, distorting the flow conditions. To avoid the "locking" effect, the WT walls are usually perforated. Thus, the study of the influence of the WT walls perforation percentage on the accuracy of the experimental results is really actual.

In the present work, the steady aerodynamic characteristics of the SC1095 helicopter profile in a wide range of pitch angles  $\alpha = 0..28^\circ$  are investigated on the basis of a specially developed CFD model of WT. The model developed in a 2D formulation on the URANS method with  $k-\omega$  SST turbulence model. The developed 2D CFD model is characterized by low computational resources costs and allows simulating both steady and unsteady airfoil aerodynamics taking into account the wind tunnel environment. The study considered three variants of WT walls perforation: 0% (without perforation), 7.5% and 15%. The obtained data have been compared with the results of modeling of airfoil in the free stream. As a result of the conducted studies, there have been made the conclusions about the influence of the WT walls perforation percentage on the flow around the airfoil at various pitch angles from 0 to 28 degrees. It has been found that at  $\alpha < 15^\circ$ , the WT model (0% perforation) does not affect the obtained airfoil aerodynamic characteristics. At  $\alpha > 15^\circ$ , distortions of the airfoil aerodynamic characteristics are observed, which increase with increasing angle  $\alpha$ . At  $15^\circ < \alpha < 20^\circ$ , a perforation of 7.5% is required to avoid the WT influence, and at  $20^\circ < \alpha < 28^\circ$ , a perforation of 15% is required.

Thus, 2D CFD model allows determining the optimal ratio of the WT walls perforation percentage, the WT cross-section size and the size of the wing section model for different test modes.

## **Верификация термодинамических параметров смеси генераторного газа на кислород – водородном топливе при высоком и низком избытке одного из компонентов топлива**

Василевский Д.О.

МАИ, г. Москва, Россия

В большинстве современных двигательных установках ракет и космических кораблей жидкостный газогенератор (ЖГГ) является необходимым агрегатом. ЖГГ представляет из себя камеру во многом похожую на камеру сгорания жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), в котором на основе экзотермических процессов разложения или горения соответствующих веществ (топлива) происходит выработка (генерация) генераторного газа со сравнительно низкой температурой порядка 500 – 1300 К.

Особенностью рабочего процесса ЖГГ является протекание рабочего процесса с малым подводом тепловой энергии к топливу. За счёт этого реакция протекает более медленно, чем в камере ЖРД. В следствии этого возможны появления высокотемпературных жгутов, которые характеризуются увеличенными температурами с неупорядоченным составом компонентов топлива, наличие которых оказывает негативное воздействие на лопатки турбины.

Преимуществом восстановительных и окислительных ЖГГ на кислород-водородных компонентах топлива является химическая кинетика самого топлива, позволяющая приводить турбины при достаточно низком или высоком коэффициенте избытка окислителя, вместе с этим продукты сгорания дают приближенные термодинамические параметры и высокую работоспособность, а также достаточную сходимость экспериментальных данных с термодинамическим расчётом.

Важнейшим термодинамическим параметром генераторного газа является произведение газовой постоянной на температуру (работоспособность газа), за счет неё водород обеспечивает высокие значения адиабатной работы газовой турбины.

В рамках исследования в процессе верификации термодинамических параметров будет определена наиболее подходящая программа для выполнения инженерных расчетов и моделирования термодинамики при низком и высоком КИО.

Литература:

1. Газогенераторы жидкостных ракетных двигателей / Березанская Е.Л., Курпатенков В.Д., Шутов Н.В. // Учебное пособие МАИ.
2. Проектные и поверочные расчеты камеры и газогенератора жидкостного ракетного двигателя / Буркальцев В.А., Дорофеев А.А., Новиков А.В. // МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.

### **Verification of thermodynamic parameters of a mixture of generator gas on oxygen-hydrogen fuel at high and low excesses of one of the fuel components**

Vasilevskiy D.O.

MAI, Moscow, Russia

In most modern propulsion systems of rockets and spacecraft, a liquid gas generator (LGG) is a necessary unit. The Gorenje gas turbine is a chamber much like the combustion chamber of a liquid rocket engine (LPRE), in which, on the basis of exothermic processes of decomposition or combustion of the corresponding substances (fuel), the generation of generator gas with a relatively low temperature of the order of 500-1300 K.

A feature of the working process of the LGG is the flow of the working process with a small supply of thermal energy to the fuel. Due to this, the reaction proceeds more slowly than in the LPRE chamber. As a result, high-temperature bundles may appear which are characterized by increased temperatures with an unordered composition of fuel components, the presence of which has a negative impact on the turbine blades.

The advantage of reducing and oxidizing LGG on oxygen-hydrogen fuel components is the chemical kinetics of the fuel itself, which allows the turbines to be driven at a sufficiently low or high coefficient of excess of the oxidizer, along with this, the combustion products give approximate thermodynamic parameters and high efficiency, as well as sufficient convergence of experimental data with thermodynamic calculation.

The most important thermodynamic parameter of the generator gas is the product of the gas constant by the temperature (gas operability), due to it, hydrogen provides high values of the adiabatic operation of the gas turbine.

As part of the study, the most suitable program for performing engineering calculations and modeling thermodynamics at low and high CIO will be determined during the verification of thermodynamic parameters.

### **Моделирование процесса взаимодействия ионизирующего излучения с веществом для разработки антропоморфного дозиметрического фантома**

<sup>1</sup>Григорьева А.А., <sup>2</sup>Милойчикова И.А., <sup>1</sup>Булавская А.А., <sup>1</sup>Стучебров С.Г.

<sup>1</sup>ТПУ, <sup>2</sup>Томский НИМЦ РАН, г. Томск, Россия

Дозиметрические фантомы применяются для исследования взаимодействия ионизирующего излучения с тканями или органами человека [1-3]. Такие устройства находят свое применение везде, где необходимо проводить оценку воздействия излучения на биологические объекты, в том числе при диагностике и терапии злокачественных новообразований, при разработке методик оценки рисков для здоровья персонала на радиационно-опасных объектах, а также для оценки радиационной нагрузки на организм человека в условиях космического излучения [4]. Дозиметрические фантомы могут

различаться геометрией и составом материалов, из которых они изготовлены. Такие устройства могут представлять собой, как простые прямоугольные сосуды с водой или набор твердотельных тканеэквивалентных однородных пластин, так и сложные гетерогенные антропоморфные фантомы [1, 2]. Авторами работы предложено разработать метод, позволяющий изготавливать гетерогенные дозиметрические фантомы с помощью технологий трехмерной печати. Материалы отдельных элементов таких фантомов должны имитировать конкретные ткани человека в отношении их взаимодействия с ионизирующим излучением.

В рамках данного исследования проведен выбор материалов, пригодных для устройств трехмерной печати и имитирующих ткани человека в отношении их взаимодействия с ионизирующим излучением. Выводы о соответствии материалов тем или иным тканям сделаны на основе результатов численного моделирования взаимодействия таких материалов с ионизирующим излучением. Моделирование проводилось с использованием методов Монте-Карло и инструментария Geant4 [5]. В качестве основного материала рассмотрен ПЛА пластик (полилактид), с использованием которого создан набор модифицированных полимерных материалов, полученных путем добавления металлических примесей в разных концентрациях.

Таким образом, с использованием инструментария Geant4, были рассчитаны распределения дозы фотонного пучка внутри биологических тканей и полимерных модифицированных материалов. Путем сравнения полученных расчетных данных, были выбраны материалы, позволяющие имитировать конкретные ткани человека в отношении их взаимодействия с ионизирующим излучением. Результаты данного исследования будут использованы при разработке антропоморфного дозиметрического фантома для проведения экспериментальной оценки воздействия ионизирующего излучения на человека.

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения 075-15-2021-271, проект № МК-3481.2021.4.

Литература:

1. Phantoms for Absolute Dosimetry: [https://www.iba-dosimetry.com/fileadmin/user\\_upload/rt-br-e-phantoms-for-ad\\_rev2\\_0813.pdf](https://www.iba-dosimetry.com/fileadmin/user_upload/rt-br-e-phantoms-for-ad_rev2_0813.pdf)

2. Electron Density Phantom Model 62 <http://www.cirsinc.com/products/all/24/electron-density-phantom/>

3. Radiology Support Devices (RSD) Alderson Phantoms: <http://www.rsdphantoms.com/images/demo/gallery/rsdbrochure.pdf>

4. Badhwar G. D. et al. Space radiation absorbed dose distribution in a human phantom //Radiation research. – 2002. – Т. 157. – №. 1. – С. 76-91 doi: 10.1667/0033-7587(2002)157[0076:SRADDI]2.0.CO;2

5. Agostinelli S. et al. GEANT4—a simulation toolkit //Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2003. – Т. 506. – №. 3. – С. 250-303 doi: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.

### **Simulation of ionizing radiation interaction with matter for development of anthropomorphic dosimetry phantom**

<sup>1</sup>Grigorieva A.A., <sup>2</sup>Miloichikova I.A., <sup>1</sup>Bulvaskaya A.A., <sup>1</sup>Stuchebrov S.G.

<sup>1</sup>TPU, <sup>2</sup>Cancer Research Institute of Tomsk NRCM, Tomsk, Russia

Dosimetry phantoms is used for investigations of ionizing radiation interaction with human tissue and organs [1-3]. These phantoms are used in any area where an assessment of the radiation effect on biological tissues is required, e.g. in radiation diagnostics and therapy of malignant tumors, in the development of methods for assessing risks to the health of personnel at radiation facilities, or to assess the radiation exposure on the human body under cosmic radiation [4]. Dosimetry phantoms can differ in geometry and composition of materials used for production. They can be made in a form of simple rectangular vessels with water filling or a set of solid tissue-equivalent homogeneous plates. Ones that are more complex are designed as heterogeneous anthropomorphic phantoms [1, 2]. The authors of the work proposed to develop a method to produce heterogeneous dosimetry phantoms using 3D printing techniques. The materials of the particular parts of such phantoms should imitate particular human tissues in terms of interaction with ionizing radiation.

In a frame of this study, the materials suitable for 3D printing devices and imitating human tissue in terms of interaction with ionizing radiation were selected. Conclusions about the correspondence of materials to particular tissues were made using results of numerical simulation of their interaction with ionizing radiation. Simulation was performed using Monte Carlo methods and Geant4 toolkit [5]. PLA plastic (polylactide) is considered as the main material, used to produce a set of modified polymer materials by adding metallic admixtures with different concentrations.

In the study, we simulated photon beam dose distribution in biological tissues and modified polymer materials using Geant4 toolkit. Based on comparison of the obtained data, materials allowing imitation of particular human tissues in terms of interaction with ionizing radiation were selected. The results of this study will be used in the development of an anthropomorphic dosimetry phantom for experimental assessment of the impact of ionizing radiation on humans.

The work is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within agreement 075-15-2021-271, project No. MK-3481.2021.4.

#### References:

1. Phantoms for Absolute Dosimetry: [https://www.iba-dosimetry.com/fileadmin/user\\_upload/rt-br-e-phantoms-for-ad\\_rev2\\_0813.pdf](https://www.iba-dosimetry.com/fileadmin/user_upload/rt-br-e-phantoms-for-ad_rev2_0813.pdf)
2. Electron Density Phantom Model 62 <http://www.cirsinc.com/products/all/24/electron-density-phantom/>
3. Radiology Support Devices (RSD) Alderson Phantoms: <http://www.rsphantoms.com/images/demo/gallery/rsdbrochure.pdf>
4. Badhwar G. D. et al. Space radiation absorbed dose distribution in a human phantom //Radiation research. – 2002. – V. 157. – №. 1. – P. 76-91 doi: 10.1667/0033-7587(2002)157[0076:SRADDI]2.0.CO;2
5. Agostinelli S. et al. GEANT4—a simulation toolkit //Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2003. – V. 506. – №. 3. – P. 250-303 doi: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.

### **Анализ целевых показателей и разработка концепции развития космических систем ДЗЗ на основе математического моделирования**

Ерешко М.В., Борисов А.В., Емельянов А.А., Жуковская К.И., Гришанцева Л.А.  
АО «РКС», г. Москва, Россия

В силу многочисленности элементов космического и наземного сегментов космической системы (КС) ДЗЗ неоднородной структуры с большим числом возможных проектных реализаций необходим механизм разработки ее концепции [1]. Концептуальный подход определяется необходимостью предварительной разработки комплекса ключевых положений, которые устанавливают общую направленность и преемственность исследования в системном проектировании КС ДЗЗ. Указанные положения являются исходными данными для следующих этапов моделирования и, в конечном итоге, реализации обоснованных технических решений по развитию КС ДЗЗ и технологического контура Оператора космических средств ДЗЗ.

Основой математического моделирования ОГ КА являются программные средства баллистического обеспечения, разработанные на базе алгоритмов численного прогноза движения КА ДЗЗ, использующие метод численного интегрирования с автоматическим выбором шага, обеспечивающим высокую точность и скорость решения системы уравнений движения. Решаемые задачи:

- Проектный анализ и синтез ОГ КА определенной структуры с оценкой потенциальных возможностей проектов многоспутниковых систем.
- Проведение статистических расчетов вероятностно-временных характеристик ОГ КА, в частности, определение вероятности одновременного попадания нескольких КА в зону радиовидимости пункта приема информации.
- Оценка количества приемных комплексов, требуемых для обслуживания ОГ КА без потерь целевой информации.
- Оценка доли покрытия заданной территории Земли полосой захвата целевой аппаратуры КА с учетом ограничений по ее включению в заданный интервал времени.

Опыт работы на моделирующем стенде Оператора космических средств ДЗЗ [2] позволил формализовать комплекс целевых показателей в различных интерпретациях в зависимости от постановки задач по развитию КС ДЗЗ в системном масштабе.

Литература:

1. Ерешко М.В., Борисов А.В. Концептуальные сценарии развития наземной космической инфраструктуры приёма целевой информации перспективной орбитальной группировки дистанционного зондирования Земли // Космическая техника и технологии. – 2021. – № 2(33).

2. Ерешко М.В., Борисов А.В., Емельянов А.А., Силин Б.Г. Решение задачи построения облика и моделирования перспективной орбитальной группировки ДЗЗ в достижении целевых параметров по периодичности и оперативности наблюдения в целях полного покрытия территории России // Системный анализ, управление и навигация: Тезисы докладов, Евпатория, 30 июня – 07 июля 2019 года. – Евпатория: Издательство МАИ-Принт, 2019. – С. 193-194.

### **Analysis of target indicators and elaboration of a concept for the development of remote sensing space systems based on mathematical modeling**

Ereshko M.V., Borisov A.V., Emelyanov A.A., Jukovskaya K.I., Grishantseva L.A.  
JSC "RSS", Moscow, Russia

Due to the large number of elements of the space and ground segments of the ERS system of an inhomogeneous structure with a large number of possible design implementations, a mechanism for developing its concept is required [1]. The conceptual approach is determined by the need for preliminary development of a set of key provisions that establish the general direction and continuity of research in the system design of the ERS system. These provisions are the initial data for the next stages of modeling and, ultimately, the implementation of reasonable technical solutions for the development of the ERS system.

The basis of the mathematical modeling of the SOC is software for ballistic support, developed on the basis of algorithms for numerical prediction of the motion of ERS satellites, using the method of numerical integration with automatic step selection, which ensures high accuracy and speed of solving the system of equations of motion. Tasks to be solved:

- Design analysis and synthesis of the SOC of a particular structure with an assessment of the potential capabilities of projects of multi-satellite systems.
- Conducting statistical calculations of the probabilistic and temporal characteristics SOC, in particular, determining the probability of simultaneous falling of several satellites into the radio visibility zone of the data receiving station.
- Assessment of the number of receiving systems required for servicing the SOC without loss of target data.
- Assessment of the portion covering a given area of the Earth swath target satellite device subject to restrictions on its turning in a given time interval.

The experience of working at the modeling stand [2] allowed formalizing a set of target indicators in various interpretations, depending on the formulation of tasks for the development of ERS system on a system scale.

References:

1. Ereshko M.V., Borisov A.V. Conceptual scenarios for development of ground infrastructure for receiving mission payload data from a perspective Earth remote sensing satellite constellation // The Space Engineering and Technology. – 2021. – № 2(33).

2. Ereshko M.V., Borisov A.V., Emelyanov A.A., Silin B.G. Solving the task of creating the appearance and modeling of a perspective ERS orbital constellation in achieving the target parameters for the revisit and operational of observation in order to fully cover the territory of Russia // System analysis, control and navigation. – Yevpatoria: Publisher MAI-Print, 2019. – P. 193-194.

## Особенности использования обратной интегральной функции распределения в моделировании двухслойной системы

<sup>1</sup>Жворонков Ю.А., <sup>2</sup>Кузьмин В.Л., <sup>1</sup>Ульянов С.В., <sup>1</sup>Вальков А.Ю.

<sup>1</sup>СПбГУ, <sup>2</sup>СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Метод Монте-Карло широко используется для моделирования распространения и рассеяния света в многослойных случайно неоднородных средах, в основном в рамках известного алгоритма MCML (Monte Carlo Multi-Layer) [1]. Нами было проведено моделирование многократного рассеяния света с учётом анизотропии рассеивателей случайно неоднородной двухслойной средой с параметрами, типичными для биологической системы череп-мозг и для других биомоделей и биотканей. Фотоны, излучённые лазерным источником, распространяются в двухслойной среде со случайными неоднородностями или флуктуациями диэлектрической проницаемости; часть фотонов в результате многократных рассеяний на неоднородностях возвращается в детектор, расположенный на некотором расстоянии от места входа фотонов в систему. Попавшие в детектор фотоны несут информацию о корреляционных свойствах слоистой случайно неоднородной среды. Значимость подобных исследований обусловлена широким спектром возможного применения устройств, созданных на основе такого подхода, в том числе устройств для диагностики травм, гематом и новообразований.

Нами был разработан модернизированный алгоритм Монте-Карло, существенно сокращающий объём и время вычислений. В рамках MCML используется тот факт, что в детектируемый сигнал вносят вклад фотоны, выходящие из рассеивающей среды. Этот подход требует довольно большой выборки из-за того, что обнаруженные фотоны могут составлять очень малую долю падающего света. В использованной в настоящей работе модификации каждый фотон вносит свой вклад в сигнал при каждом акте рассеяния, пока он не покинет среду. Таким образом, количество фотонов может быть существенно уменьшено, что значительно сокращает время вычислений. [2]

Мы рассматриваем неоднородную среду, в которой параметры рассеяния зависят от глубины проникновения [2], т.е. от декартовой координаты  $z$ , нормальной к границам, в частности от координаты  $z$  зависит коэффициент затухания излучения. Мы разработали схему обратного преобразования интегральной функции распределения вероятности расстояния, пройденного до акта рассеяния, для фотона, движущегося внутри среды. Кумулятивная функция распределения вычисляется на каждом шаге распространения фотона. Вид интегральной функции распределения зависит от предыдущего положения фотона относительно границы между слоями, а также от направления движения. Рассмотрение коэффициента затухания в качестве функции глубины проникновения приводит, в свою очередь, к появлению поправочного (по сравнению с MCML [3]) коэффициента нормировки для интегральной функции распределения. Подобный подход позволил существенно сэкономить время вычислений и получить результаты, уточнённые по сравнению с результатами, полученными при помощи стандартного метода MCML.

Литература:

1. L. Wang, S. Jacques, and L. Zheng, "MCML – Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues", *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 47, pp. 131–146, 1995.
2. V. Kuzmin, M. Neidrauer, D. Diaz, L. Zubkov, "Diffuse photon density wave measurements and Monte Carlo simulations", *J. Biomed. Opt.*, vol. 20(10), p. 105006-1–9, October, 2015.
3. Robert Francis, Bilal Khan, George Alexandrakis, James Florence, and Duncan MacFarlane "NIR light propagation in a digital head model for traumatic brain injury (TBI)", *Biomed Opt Express*, 2015 Sep 1; 6(9): 3256–3267.

### Features of using an inverse transform function in the modelling of a two-layer system

<sup>1</sup>Zhavoronkov Y.A., <sup>2</sup>Kuzmin V.L., <sup>1</sup>Ulyanov S.V., <sup>1</sup>Valkov A.Y.

<sup>1</sup>SPbU, <sup>2</sup>SPbPU, Saint-Petersburg, Russia

The Monte Carlo method is widely used to simulate the propagation and scattering of light in multilayered randomly inhomogeneous media, mainly within the well-known Monte Carlo Multi-Layer (MCML) algorithm [1]. We have performed a simulation of multiple light scattering including scatterer anisotropy in a randomly inhomogeneous bilayer medium with parameters

typical of the skull-brain biological system and other biomodels and biotissues. Photons emitted by a laser source propagate in a bilayer medium with random inhomogeneities or fluctuations in dielectric constant; some of the photons, as a result of multiple scattering on inhomogeneities, return to the detector located some distance from the photons' entry point. The photons entering the detector carry information about the correlation properties of the layered randomly inhomogeneous medium. The significance of such research is due to the wide range of possible applications of devices based on this approach, including devices for diagnosing injuries, hematomas and neoplasms

We have developed an improved Monte Carlo algorithm that significantly reduces the amount and time of computation. MCML takes advantage of the fact that photons leaving the scattering medium contribute to the detected signal. This approach requires a rather large sample due to the fact that the detected photons can constitute a very small fraction of the incident light. In the modification used in the present work each photon contributes to the signal at each act of scattering until it leaves the medium. In this way the number of photons can be significantly reduced, which greatly reduces the computation time. [2]

We consider an inhomogeneous medium in which the scattering parameters depend on the penetration depth [2], i.e. on the Cartesian coordinate  $z$  normal to the boundaries, in particular the emission attenuation factor depends on the  $z$  coordinate. We have developed a scheme for inverse transformation of the integral probability distribution function of the distance traveled to the scattering act for a photon moving inside the medium. The cumulative distribution function is computed at each photon propagation step. The form of the integral distribution function depends on the previous position of the photon relative to the boundary between the layers as well as on the direction of motion. Considering the attenuation coefficient as a function of the penetration depth leads, in turn, to a correction factor (compared to MCML [3]) for the integral distribution function. Such an approach has significantly saved computational time and yielded results that are refined compared to those obtained using the standard MCML method.

References:

1. L. Wang, S. Jacques, and L. Zheng, "MCML – Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues", *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 47, pp. 131–146, 1995.
2. V. Kuzmin, M. Neidrauer, D. Diaz, L. Zubkov, "Diffuse photon density wave measurements and Monte Carlo simulations", *J. Biomed. Opt.*, vol. 20(10), p. 105006-1–9, October, 2015.
3. Robert Francis, Bilal Khan, George Alexandrakis, James Florence, and Duncan MacFarlane "NIR light propagation in a digital head model for traumatic brain injury (TBI)", *Biomed Opt Express*, 2015 Sep 1; 6(9): 3256–3267.

### **Исследование и разработка алгоритмов создания средств человеко-машинного интерфейса систем ЧПУ с применением web-технологий**

Квашнин Д.Ю., Нежметдинов Р.А., Ковалев И.А.

СТАНКИН, г. Москва, Россия

На текущем этапе развития терминальных приложений для систем ЧПУ внимание уделяется мобильной технике. Такие устройства способны отображать большой объем технологической, диагностической и другой информации о работе ЧПУ, а также могут оповещать о различных нештатных ситуациях.

Минусом данного этапа развития является отсутствие способа предоставления большого набора информации, ее систематизация, вывод только необходимых данных в текущий момент времени и зачастую их избыточность. В работе исследуются проблемы реализации подхода, заключающиеся в отсутствии взаимосвязей между НМИ и необходимым набором данных, способным изменяться в реальном времени в системах ЧПУ, а также отсутствием архитектурной модели гибкого и настраиваемого взаимодействия компонентов ЧПУ с прикладными клиентскими приложениями.

В качестве предоставления информации был выбран способ web-экранов. Для передачи информации для отображения в сторонние терминалы использовались API систем ЧПУ. В работе представлена работа с ЧПУ «АксиОМА Контроль», но большинство популярных ЧПУ также поддерживают свой API. Данные о работе пользователя с НМИ системы ЧПУ передавались во внешний модуль. Use-case сценарии включают использование

пользовательской выборки, в которой учитывался режим работы, переходы между технологическими экранами ЧПУ, время действий на конкретном экране и т.д. Для построения новых web-экранов был использован аппаратных нейронных сетей для определения необходимых компонентов для конкретной роли пользователя.

Для достижения поставленной цели была выбрана сеть Long short-term memory (LSTM), относящаяся к рекуррентным нейронным сетям. LSTM - универсальная нейронная сеть, при достаточном наборе слоев и нейронов она может быть использована для любых задач, требующих вычисления, но для задач классификации, обработки и прогнозирования временных рядов (как раз подходящих под создаваемое решение) показала наиболее оптимальные результаты.

В качестве frontend приложение используется JavaScript фреймворк Vue.JS. В качестве сервера выступает nginx, т.к. ожидается итеративные правки и отдача множество статических файлов.

Был разработан тестовый вариант модуля. Тестирование проводилось с применением лабораторного стенда фрезерного станка с системой ЧПУ «АксиОМА Контрол». Оператор использовал НМИ для работы ЧПУ, а на внешнем планшете отображалась web-страница, компоненты которой получались на основе пользовательской выборки и работы LSTM сети. Отображение на планшете происходило не в реальном времени, а после того, как оператор закончил работу. В тестовом варианте была «сверстана» web-страница, на которой были представлены только те компоненты (и в той последовательности), которыми пользовался конкретный оператор.

Литература:

1. Industry 4.0 Capturing value at scale in discrete manufacturing. McKinsey & Company, Advanced Industries 2019.
2. Martinova L.I., Kozak N.V., Kovalev I.A. and Ljubimov A.B. "Creation of CNC system's components for monitoring machine tool health". Int J Adv Manuf Technol
3. Kovalev, I., Nezhmetdinov, R., and Kvashnin, D. "Big data analytics of the technological equipment based on Data Lake architecture". In MATEC Web of Conferences (Vol. 298, p. 00079). EDP Sciences.

### **Research and development of algorithms for creating human-machine interface tools for CNC systems using web technologies**

Kvashnin D.Y., Nezhmetdinov R.A., Kovalev I.A.

STANKIN, Moscow, Russia

At the current stage of development of terminal applications for CNC systems, attention is paid to tablet computers and mobile phones. These devices, although they do not meet the safety requirements for direct control of machine tool units, are capable of displaying a large amount of technological, diagnostic, statistical and other information about the operation of the control system, and can also notify technical personnel about various emergency situations.

The disadvantage of this stage of development is the lack of a way to provide such a large set of information, its systematization, the output of only the necessary data at the current time, in other words, the inconvenience of working with the received data in terminal clients and often their redundancy. The paper investigates the problems of implementing such an approach, which consist in the absence of interconnections between the HMI subsystem and a certain necessary set (capable of changing in real time) of technological information in control systems of CNC systems, as well as the absence of an architectural model of flexible and customizable interaction of the core components of an automated process control system. with applied client applications.

The method of web-screens was chosen as the provision of information. To transfer information for display in third-party terminals, an approach was proposed using the API of CNC systems. The work considered the work with CNC "AxiOMA Control", but most of the popular CNCs also support API. Data on the user's work with the HMI of the CNC system was transferred to the external module. Use-case scenarios include the use of a custom selection, which took into account the operating mode, transitions between CNC technological screens, pressed buttons, time of actions on a specific screen, etc. To build new web screens, hardware neural networks were used to determine the necessary components for a specific user role.

An analysis was carried out of the capabilities of various architectural solutions of neural networks, as a subclass of machine learning to achieve this goal, and Long short-term memory (LSTM) was chosen, referring to recurrent neural networks. LSTM is a universal neural network, with a sufficient set of layers and neurons, it can be used for any tasks requiring computation, but for tasks of classification, processing and forecasting of time series (just suitable for the solution being created), it shows the most optimal results.

JavaScript framework Vue.JS is used as a frontend application. Vue.JS allows you to create an interactive and lightweight application. The popular nginx acts as a server, since iterative edits are expected and many static files are served. To improve performance and reduce the load from the application server.

A test version of the module was developed. Testing was carried out using a laboratory bench of a milling machine with a CNC system "AxiOMA Control". The operator used the HMI to operate the CNC, and a web page was displayed on an external tablet, the components of which were obtained based on the user selection and the operation of the LSTM network. The display on the tablet did not take place in real time, but after the operator had finished work. In the test version, a web page was "typeset", on which only those components (and in the order) that were used by a particular operator were presented.

### **Кластеризация рукописных цифр нейронной сетью Кохонена с использованием CUDA**

Латыпова Д.С., Тумаков Д.Н.  
КФУ, г. Казань, Россия

Проведена кластеризация рукописных цифр из базы данных MNIST с использованием нейронной сети Кохонена. Для каждой цифры определено оптимальное количество кластеров. Количество кластеров для каждой цифры разное, но не превышает 50. Евклидова норма использована для оценки расстояния между изображениями цифр, хотя для оценки расстояний могут использоваться и другие метрики. Изображения из тестовой выборки принадлежат правильному кластеру с вероятностью более 90% для каждой цифры. Это свидетельствует о том, что кластеризацию можно использовать для распознавания образов цифр. Наилучшая кластеризация была получена для цифр 0 и 1 (F-мера равна 0,97), в то время как цифра 9 была наихудшей кластеризованной – F-мера равна 0,903.

Алгоритм обучения нейронной сети Кохонена был распараллелен на графическом процессоре с использованием технологии CUDA. Приведено сравнение времени обучения на процессоре и графическом процессоре. Для оценки точности построения кластера использована тестовая выборка базы MNIST. Алгоритм кластеризации был ускорен почти в 17 раз (на обычном ноутбуке). Предлагаемый подход может быть использован для кластеризации больших данных различной сложности.

Нейронную сеть Кохонена можно использовать для распознавания паттернов рукописного ввода, поскольку большой процент изображений цифр из тестовой выборки попадает в требуемый кластер. Обратим внимание, что для плохо распознаваемых цифр, таких как 9, возможно увеличение числа кластеров.

Также для решения задач распознавания изображений могут быть использованы и другие нейронные сети. В этом случае кластеризация может быть выбрана в качестве одного из этапов распознавания. Например, кластеризацию можно использовать в качестве одной из составляющих в иерархической нейронной сети.

Литература:

1. Latypova, D.: Neural networks using for handwritten numbers recognition. M. Eng. Thesis, Czech Technical University, Prague, Czech Republic, 1-62 (2020)
2. Rxy, M., Lavanya, K.: Handwritten digit recognition of MNIST data using consensus clustering. Int. J. Recent Technol. Eng. 7(6), 1969-1973 (2019)
3. Nhery, S., Ksantini, R., Kaaniche, M.B., Bouhoula, A.: A novel handwritten digits recognition method based on subclass low variances guided support vector machine. 13th Int. Joint Conf. on Comput. Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and App. 4, 28-36 (2018)

## Clustering of handwritten digits by the Kohonen neural network using CUDA

Latypova D.S., Tumakov D.N.

KFU, Kazan, Russia

The clustering of handwritten digits from the MNIST database using the Kohonen neural network was carried out. For each digit, the optimal number of clusters was determined. The number of clusters for each digit is different, but does not exceed 50; a choice of the number of clusters is proposed. The Euclidean norm is used to estimate the distance between the images of the digits, although other metrics can be used to estimate the distances. Images from the test sample belong to the correct cluster with a probability of more than 90% for each digit. This suggests that clustering can be used to recognize patterns of digits. The best clustering was derived for the digits 0 and 1 (F-measure is 0.97), while the digit 9 was the worst clustered – F-measure is 0.903.

The Kohonen neural network training algorithm was parallelized on the GPU using the CUDA technology. The comparison of training time on the CPU and the GPU is provided. A test sample is used to evaluate the accuracy of cluster construction. The algorithm was accelerated approximately 17 times. The proposed approach can be used for clustering large data of varying complexity.

Kohonen's neural network can be used to recognize patterns of handwritten digits, because a great percentage of images of digits from the test sample fall into the required cluster. Note that for poorly recognized digits, such as 9, it is possible to increase the number of clusters.

Other neural networks can also be used to solve recognition problems. Clustering of data can be selected as one of the stages of image recognition. For example, clustering can be used as a stage in a hierarchical neural network.

References:

1. Latypova, D.: Neural networks using for handwritten numbers recognition. M. Eng. Thesis, Czech Technical University, Prague, Czech Republic, 1-62 (2020)
2. Remy, M., Lavanya, K.: Handwritten digit recognition of MNIST data using consensus clustering. Int. J. Recent Technol. Eng. 7(6), 1969-1973 (2019)
3. Nhery, S., Ksantini, R., Kaaniche, M.B., Bouhoula, A.: A novel handwritten digits recognition method based on subclass low variances guided support vector machine. 13th Int. Joint Conf. on Comput. Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and App. 4, 28-36 (2018)

## Инкрементальное эвристическое динамическое программирование

Мазаев А.С.

МАИ, г. Москва, Россия

Во время полета с летательным аппаратом (ЛА) могут произойти различного рода отказы, как внутренние (отказ привода руля направления), так и внешние (поломка двигателя из-за попадания птицы). Стандартные методы управления, которые применяются на текущий момент в ЛА, не могут самостоятельно адаптироваться к изменившемуся объекту управления, вследствие чего пилоту приходится брать управление на себя. С целью

адаптации и автоматизации закона управления предлагается метод, основанный на инкрементальном эвристическом динамическом программировании (IHDP). Для решения поставленной задачи сформирована математическая модель полного углового движения, которая представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений, традиционную для динамики полета самолетов. В данной работе

рассматриваются две задачи, одна – только в продольном канале, вторая – и в продольном, и боковом канале. Для моделирования системы управления использовались две модели: линеаризованная модель и нелинейная модель. В качестве примера конкретного объекта моделирования рассматривается маневренный самолет F-16. Требуемые исходные данные для него были взяты из работы [4]. Для синтеза закона управления используется алгоритм Incremental Model-Based Heuristic Dynamic Programming IHDP, основанный на алгоритме Heuristic Dynamic Programming HDP.

HDP – это наиболее широко используемый метод Adaptive Critic Design (ACD), который оптимизирует качество работы всей системы. IHDP включает в себя три главных блока:

1. Инкрементальная модель – предназначена для определения динамики системы.
2. Исполнитель – предназначен для создания управляющего сигнала.
3. Критик – предназначен для оценки действий исполнителя.

Использование данного метода показало высокую степень адаптивности к внутренним и внешним возмущениям при различных начальных условиях.

Литература:

1. Sun, Bo and Van Kampen, Erik-Jan, Incremental Model-Based Heuristic Dynamic Programming with Output Feedback Applied to Aerospace System Identification and Control. 10.1109, CCTA41 146.2020.9206261.

2. Ye Zhou and Van Kampen, Erik-Ja and Chu, Qiping, Incremental model based online heuristic dynamic programming for nonlinear adaptive tracking control with partial observability. Aerospace Science and Technology. 106013. 10.1016/j.ast.2020.106013.

3. D. Wang, D. Liu, Q. Wei, D. Zhao, and N. Jin Optimal control of unknown nonlinear discrete-time systems based on adaptive dynamic programming. Automatica, vol. 48, no. 8, pp. 18251832, 2012.

4. Бочкарев А.Ф. Аэромеханика самолета: Динамика полета М.:Машиностроение, 1985. 360 с.

5. Nguyen L.T., Ogburn M.E., Gilbert W.P., Kibler K.S., Brown P.W., Deal P.L. Simulator study of stall/poststall characteristics of fighter airplane with relaxed longitudinal static stability., NASA TP-1538, Dec. 1979, 223p

### **Incremental heuristic dynamic programming**

Mazaew A.S.

MAI, Moscow, Russia

During a flight with an aircraft, various kinds of failures can occur, both internal (rudder drive failure) and external (engine breakdown due to a bird hit). The standard control methods that are currently used in the aircraft cannot independently adapt to the changed control object, as a result of which the pilot has to take control. With the aim of adaptation and automation of the control law, a method based on incremental heuristic dynamic programming (IHDP) is proposed. To solve this problem, a mathematical model of total angular motion was formed, which is a system of nonlinear differential equations, traditional for the dynamics of aircraft flight. In that work two problems are considered, one – only in the longitudinal canal, the second – in both the longitudinal and lateral canals. To simulate the control system, two models were used: a linearized model and a nonlinear model. As an example of a specific object of modeling, the maneuverable F-16 aircraft is considered. The required initial data for it were taken from [4]. To synthesize the control law, the Incremental Model-Based Heuristic Dynamic Programming IHDP algorithm is used, based on the Heuristic Dynamic Programming HDP algorithm.

HDP is the most widely used Adaptive Critic Design (ACD) method, which measures the performance of an entire system. IHDP comprises three main blocks:

1. Incremental model – designed to determine the dynamics of the system.
2. Executor – designed to create a control signal.
3. Critic – designed to assess the actions of the performer.

The use of this method has shown a high degree of adaptability to internal and external disturbances under various initial conditions.

References:

1. Sun, Bo and Van Kampen, Erik-Jan, Incremental Model-Based Heuristic Dynamic Programming with Output Feedback Applied to Aerospace System Identification and Control. 10.1109, CCTA41 146.2020.9206261.

2. Ye Zhou and Van Kampen, Erik-Ja and Chu, Qiping, Incremental model based online heuristic dynamic programming for nonlinear adaptive tracking control with partial observability. Aerospace Science and Technology. 106013.10.1016 / j.ast.2020.106013.

3. D. Wang, D. Liu, Q. Wei, D. Zhao, and N. Jin Optimal control of unknown nonlinear discrete-time systems based on adaptive dynamic programming. Automatica, vol. 48, no. 8, pp. 18251832, 2012.

4. Bochkarev A.F. Aircraft aeromechanics: Flight dynamics M.: Mashinostroenie, 1985.360 p.

5. Nguyen L. T., Ogburn M. E., Gilbert W. P., Kibler K.S., Brown P. W., Deal P. L. Simulator study of stall / poststall characteristics of fighter airplane with relaxed longitudinal static stability., NASA TP-1538, Dec. 1979, 223p

## **О возможности применения алгоритмов компьютерного зрения для распознавания объектов в технологии селективного лазерного сплавления**

<sup>1</sup>Молотков А.А., <sup>2</sup>Третьякова О.Н.

<sup>1</sup>МАИ, <sup>2</sup>НПП «Лазеры и аппаратура», г. Москва, Россия

Работа посвящена возможности применения алгоритмов компьютерного зрения для распознавания объектов в технологии селективного лазерного сплавления (SLM). В статьях [1-3] описаны проведенные нами численное моделирование и экспериментальное исследование процесса SLM. Создаваемая нами масштабируемая программная платформы для реализации новой аддитивной SLM технологии имеет блочную структуру. Одним из блоков является разрабатываемая нами программа на языке C# детектирования объектов с использования различных методов распознавания «CV Multitool», позволяющая определять выступы, провалы и контур деталей на изображении. Использование компьютерного зрения, методов и алгоритмов, с помощью которых компьютер может обрабатывать изображения, позволяет определять, что изображено, классифицировать и анализировать изображения. Это актуально для контроля качества детали непосредственно в процессе изготовления. При разработке программы мы использовали EmguCV-кросс-платформенное .Net дополнение для библиотеки Open CV обработки изображений, AForge-библиотеку компьютерного зрения и искусственного интеллекта, и собственные алгоритмы детектирования границ. Проведен сравнительный анализ различных методов распознавания, таких как угловые детекторы Моравека, Харриса, FAST, Ши-Томаси, MSER, детектор для определения границ изображения Кэнни. Созданные подпрограммы получают от источника изображения формата jpeg или bitmap, работают на основе использования отдельных из перечисленных детекторов. В итоге, программное обеспечение «CV Multitool», объединяющее эти подпрограммы, позволит выбрать оптимальный метод распознавания для каждого конкретного технологического режима работы лазерной установки.

Литература:

1. Лебёдкин И. Ф., Молотков А. А., Третьякова О. Н. Математическое моделирование сложного теплообмена при разработке лазерных SLM технологий. // Труды МАИ: Электронный журнал, ISSN:1727-6924, №101, 2018.

2. Molotkov A.A. , Tretyakova O.N. On possible approaches to visualizing the process of selective laser melting/ Scientific Visualization, 2019, volume 11, number 4, pages 1 - 12, DOI: 10.26583/sv.11.4.01 <http://sv-journal.org/2019-4/?lang=en>

3. Лебёдкин И. Ф., Молотков А. А., Третьякова О. Н. Разработка промышленной технологии селективного лазерного сплавления // Прикладная физика. 2020. № 3. С. 83-89.

### **On the possibility of using computer vision algorithms for object recognition in the technology of selective laser melting**

<sup>1</sup>Molotkov A.A., <sup>2</sup>Tretyakova O.N.

<sup>1</sup>MAI, <sup>2</sup>SPC “Lasers and equipment”, Moscow, Russia

The paper is devoted to the possibility of using computer vision algorithms for object recognition in selective laser melting (SLM) technology. The articles [1-3] describe the numerical modeling and experimental study of the SLM process carried out by us. The scalable software platform we are creating for the implementation of a new additive SLM technology has a block structure. One of the blocks is a program we are developing in the C# language for detecting objects using various recognition methods "CV Multitool", which allows us to determine protrusions, dips and the contour of details in the image. The use of computer vision-methods and algorithms with which a computer can process images, allows you to determine what is depicted, classify and analyze images. This is important for quality control of the part directly during the manufacturing process. When developing the program, we used EmguCV-cross-platform .Net is an add-on for the Open CV library of image processing, AForge is a library of computer vision and artificial intelligence and its own algorithms for detecting borders. A comparative analysis of various recognition methods, such as Moravec, Harris angle detectors, FAST, Shi-Tomasi, MSER, a detector for determining the boundaries of the Canny image, is carried out. The created routines receive jpeg or bitmap images from the source, work on the basis of using individual of the listed detectors. As a result, the "CV Multitool" software, which combines these routines, will allow you to choose the

optimal recognition method for each specific technological mode of operation of the laser installation.

References:

1. Лебёдкин И. Ф., Молотков А. А., Третьякова О. Н. Математическое моделирование сложного теплообмена при разработке лазерных SLM технологий. // Труды МАИ: Электронный журнал, ISSN:1727-6924, №101, 2018.
2. Molotkov A.A., Tretiyakova O.N. On possible approaches to visualizing the process of selective laser melting/ Scientific Visualization, 2019, volume 11, number 4, pages 1 - 12, DOI: 10.26583/sv.11.4.01 <http://sv-journal.org/2019-4/?lang=en>
3. Лебёдкин И. Ф., Молотков А. А., Третьякова О. Н. Разработка промышленной технологии селективного лазерного сплавления // Прикладная физика. 2020. № 3. С. 83-89.

### **Оптимизация коэффициентов $k-\omega$ SST модели турбулентности в задаче моделирования склонового потока с помощью алгоритмов машинного обучения**

Романова Д.И., Стрижак С.В.  
ИСП РАН, г. Москва, Россия

Изучение схода снежных лавин, грязекаменных селей и других опасных потоков на склонах гор является актуальной задачей с точки зрения обеспечения безопасности жизнедеятельности людей в горных районах РФ.

Для моделирования схода склонового потока используется математическая модель многофазного односкоростного подхода. Одна из фаз – воздух, другая фаза – материал потока (снег или грязекаменная смесь). Фаза материала потока представлена реологическими соотношениями Хершеля-Балкли. Для замыкания уравнений Рейнольдса используется  $k-\omega$  SST модель турбулентности. Для отслеживания границы свободной поверхности используется метод объёма жидкости (VOF), предложенный Хиртом и Николсом [1]. Две несжимаемые и не смешиваемые фазы представлены в вычислительной области некоторой смесью с физическими характеристиками, посчитанными по принципу весового среднего. Данная математическая модель реализована в решателе interFoam пакета OpenFOAM.

Используемая двухпараметрическая модель турбулентности  $k-\omega$  SST не обеспечивает удовлетворительной точности во многих типах течений, включая простые сдвиговые потоки, к которым можно отнести потоки на склонах [2].

В работе проводится калибровка  $k-\omega$  SST модели турбулентности с использованием алгоритма оптимизации Нелдера-Мида с целью увеличения точности расчёта.

С помощью полученной модели произведён расчёт 22-ого лавинного очага на горе Юкспор, Хибины.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (номер соглашения № 075-15-2020-808).

Литература:

1. Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries. Journal of Computational Physics, 39(1):201–225, 1981.
2. Tracey B., Duraisamy K., Alonso J. Application of supervised learning to quantify uncertainties in turbulence and combustion modeling. 01 2013.

### **$K-\omega$ SST turbulence model coefficients optimization for slope flows modeling using machine learning techniques**

Romanova D.I., Strijhak S.V.  
ISP RAS, Moscow, Russia

Mathematical modeling of snow avalanches, mudflows and other dangerous slope flows is an urgent task to ensure the life safety in the mountainous regions of Russian Federation.

A mathematical model of the multiphase single velocity approach is used to simulate the slope flow. One of the phases is air, the other phase is the flow material (snow or mud-stone mixture). The material phase of the flow is represented by the Herschel-Bulkley rheological ratios. The  $k-\omega$  SST turbulence model is used to close the Reynolds equations. The volume of liquid (VOF) method proposed by Hirt and Nichols [1] is used to determine the free surface. Two incompressible and

immiscible phases are represented in the computational domain by a mixture with physical characteristics calculated according to the principle of the weighted average. This mathematical model is implemented in the interFoam solver of the OpenFOAM package.

The used two-parameter  $k-\omega$  SST turbulence model does not provide satisfactory accuracy in many types of flows, including simple shear flows, which include flows on the slopes [2].

In this work, the  $k-\omega$  SST turbulence model is calibrated using the Nelder-Mead optimization algorithm in order to increase the calculation accuracy.

The calibrated turbulence model was used to calculate the snow avalanche on Mount Yukspor (Khibiny).

This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, agreement No 075-15-2020-808.

References:

1. Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1):201–225, 1981.
2. Tracey B., Duraisamy K., Alonso J. Application of supervised learning to quantify uncertainties in turbulence and combustion modeling. 01 2013.

### **Исследование межпроцессного взаимодействия компьютерной модели и графического пользовательского интерфейса**

Тищенко Д.Ю., Правидло М.Н., Бирюков П.А., Мацера М.С.

АО «ГосМКБ «Вымпел» им. И.И. Торопова», г. Москва, Россия

Компьютерное моделирование широко используется в научно-технической деятельности, являясь удобным инструментом исследований. Однако, вопросам сервиса для моделирующей программы, а именно: создания и поддержки системы исходных данных, управления статистическим моделированием, экспресс-анализа и визуализации результатов, уделяется недостаточное внимание. Зачастую пользовательский интерфейс разрабатывается под конкретную задачу и трудно модифицируется для новых разработок.

Концепция модульной системы моделирования (МСМ), используемая в разработанном графическом пользовательском интерфейсе (ГПИ) позволяет обеспечить эффективную работу с существующими и вновь создаваемыми компьютерными моделями (КМ). При этом ГПИ является универсальным инструментом, не встраивается в КМ и не зависит от языка программирования КМ, обеспечивая весь сервис запуска КМ, поддержки исходных данных и экспресс-обработки результатов.

В рамках рассматриваемой концепции КМ является автономным консольным приложением, реализующим весь расчётный алгоритм математической модели. Запуск и управление режимом работы КМ производится из ГПИ.

ГПИ является графическим приложением с развитым пользовательским интерфейсом, работающим в среде Windows и построенным на базе технологии Windows Presentation Foundation.

В данной работе рассмотрен вопрос организации запуска КМ и экспресс-анализа результатов моделирования «на лету» с помощью межпроцессного взаимодействия КМ и ГПИ.

Общее управление КМ из ГПИ достигается через стандартный поток консольного ввода-вывода.

Обмен рабочими данными между КМ и ГПИ может осуществляться разными способами:

1. через файловую систему, при этом ГПИ и КМ постоянно записывают и читают данные из файлов, генерируемых КМ. Формат таких файлов должен быть единым для КМ и ГПИ;
2. через оперативную память компьютера посредством различных механизмов.

Для отображения результатов вычислений в реальном времени, второй способ обладает преимуществом в производительности, однако подразумевает более глубокую интеграцию программ КМ и ГПИ.

В данной статье рассмотрено сравнение производительности моделирующей системы с обменом данными через файлы и с использованием технологии именованных каналов «Named pipe».

Литература:

1. Правидло М.Н., Бирюков П.А., Тищенко Д.Ю., Мацера М.С. Графический пользовательский интерфейс для работы с компьютерными моделями // Сборник тезисов докладов IV Всероссийской научно-технической конференции «Моделирование авиационных систем» (г. Москва, 26–27 ноября 2020 г.). Москва: ФГУП «ГосНИИАС», 2020. С. 66–67.

2. Эндрю Троелсен, Филипп Джепикс. Язык программирования C# 7 и платформы .NET и .NET Core. 8-е изд.: Пер. с англ. – СПб.: ООО «Диалектика». 2018 – 1328 с.: ил. – Парал. тит. англ.

3. Named Pipes [Электронный ресурс]: Microsoft technical documentation, 2018. URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/win32/ipc/named-pipes> (дата обращения: 20.06.2021).

### **Research of interprocess communication of a computer model and a graphical user interface**

Tishchenko D.Y., Pravidlo M.N., Biryukov P.A., Matsera M.S.  
JSC “SMBDB “Vympel” of I.I. Toropov”, Moscow, Russia

Computer modeling is widely used in scientific and technical activities, being a convenient research tool. However, insufficient attention is paid to the service issues for the modeling program, namely: creating and maintaining a initial data system, managing statistical modeling, express analysis and visualization of results. Often, the user interface is developed for a specific task and is difficult to modify for new developments.

The concept of a modular modeling system (MSM) used in the developed graphical user interface (GUI) allows for effective work with existing and newly created computer models (CM). At the same time, the GPI is a universal tool, it is not embedded in the CM and does not depend on the CM programming language, providing the entire service for launching CM, supporting initial data and express processing of results.

In this concept CM is an autonomous console application that implements the entire calculation algorithm of a mathematical model. The CM is started and controlled from the GPI.

GPI is a graphical application with a developed user interface running in a Windows environment and built on the basis of Windows Presentation Foundation technology.

In this paper, the issue of organizing the launch of CM and express analysis of the simulation results "on the fly" using the interprocess communication of CM and GPI is considered.

The general management of CM from the GPI is achieved through a standard console I / O stream.

The exchange of working data between the CM and the GPI can be carried out in different ways:

1. through the file system, while the GPI and CM constantly write and read data from files generated by the CM. The format of such files should be the same for KM and GPI;
2. through the computer's RAM through various mechanisms.

To display the results of calculations in real time, the second method has an advantage in performance, but it implies a deeper integration of CM and GPI programs.

This article discusses the comparison of the performance of the modeling system with data exchange via files and using the Named pipe technology.

### **Моделирование процессов тепломассообмена в ходе синтеза станидов железа в реакционных тиглях**

<sup>1</sup>Фомин В.Е., <sup>1</sup>Новотельнова А.В., <sup>1</sup>Тукмакова А.С., <sup>2</sup>Бочканов Ф.Ю., <sup>2</sup>Карпенков Д.Ю.

<sup>1</sup>ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>МИСиС, г. Москва, Россия

Синтез методом тепловыделения внутри реакционной зоны используется для поиска новых составов и фаз функциональных материалов постоянных магнитов. В ходе синтеза через установку и образец (в жидком агрегатном состоянии) проходит ток высокой плотности, вызывая диффузию между материалами образца и тигля. В результате, вблизи контакта образца и тигля образуются области с различной концентрацией исходных компонентов, формирующие новые фазы.

Поле температуры в установке и образце является одним из важнейших технологических параметров синтеза. Аналитический расчет температуры невозможен ввиду большого числа

взаимосвязанных процессов [1,2]: прохождение тока и выделение теплоты Джоуля, термомеханические процессы, электромиграция ионов и диффузионные процессы. Для решения данной задачи целесообразно применять численное моделирование.

С целью изучения поля температуры была создана модель в программной среде Comsol Multiphysics. Принимались во внимание различные физические модули для максимально точного расчета. При создании модели использовались следующие модули: теплообмен в твердых и жидких телах (“Heat transfer in solids”, “Heat transfer in fluids”), диффузия (“Transport of concentrated species”), механика твердого тела (“Solid Mechanics”), электричество (“Electric currents”). С целью уменьшения потребления вычислительных ресурсов модель была создана двухмерной осесимметричной.

Исследование было проведено на примере образца жидкого олова, находящегося в железном тигле. Была исследована зависимость поля концентрации олова в железе от различных температурных режимов. Температурные режимы определялись величиной прикладываемой к краям установки разности потенциалов и результирующей плотности тока.

Длительность моделируемого процесса составляла 6 часов, что соответствовало экспериментальным условиям. После моделирования оценивалась толщина диффузионного слоя, с концентрацией олова 40 %. Подаваемая разность потенциалов изменялась в диапазоне от 1.4 В до 1.8 В, в результате чего температура образца и тигля принимала значения от 1000 К до 1300 К. При этом, после установления стационарного режима, образец и тигель имели одинаковую температуру. После шестичасового процесса толщина исследуемого слоя достигала значений от 3 до 6 мкм.

Литература:

1. Lloyd J. R., Tu K. N., Jaspal J. The physics and materials science of electromigration and thermomigration in solders //Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies. – CRC Press, 2004. – С. 844-867.

2. Gutfleisch O. et al. Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient //Advanced materials. – 2011. – Т. 23. – №. 7. – С. 821-842.

### **Modeling of heat and mass exchange processes during synthesis of iron standides in reactive crucibles**

<sup>1</sup>Fomin V.E., <sup>1</sup>Novotelnova A.V., <sup>1</sup>Tukmajova A.S., <sup>2</sup>Bochkanov F.Y., <sup>2</sup>Karpenov D.Y.

<sup>1</sup>ITMO, Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup>MISIS, Moscow, Russia

The synthesis process with a heat release inside the reaction zone is used to search for new compositions and phases of functional materials of permanent magnets. During synthesis, a high-density current passes through the apparatus and the sample (in the liquid state of aggregation), causing diffusion between the materials of the sample and the crucible. As a result, regions with different concentrations of the initial components are formed near the contact between the sample and the crucible.

The temperature field in the setup and the sample is one of the most important technological parameters of the synthesis. An analytical calculation of temperature is impossible due to a large number of interrelated processes [1,2]: the passage of current and the release of Joule heat, thermomechanical processes, electromigration of ions and diffusion processes. It is advisable to use numerical modeling to solve this problem

In order to study the temperature field, a model was created in the Comsol Multiphysics software environment. Various physical modules were taken into account for the most accurate calculation. When creating the model, the following modules were used: “Heat transfer in solids”, “Heat transfer in fluids”, “Transport of concentrated species”, “Solid Mechanics”, “Electric currents”. In order to reduce the consumption of computational resources, the model was created as a two-dimensional axisymmetric one.

The study was carried out on the example of a sample of liquid tin in an iron crucible. The dependence of the field of tin concentration in iron on various temperature regimes was investigated. Temperature conditions were determined by the value of the potential difference applied to the edges of the installation and the resulting current density.

The duration of the simulated process was 6 hours, which corresponded to the experimental conditions. After modeling, the thickness of the diffusion layer was estimated, with a tin concentration of 40%. The applied potential difference varied in the range from 1.4 V to 1.8 V, as a result, the temperature of the sample and the crucible reached values from 1000 K to 1300 K. In this case, after the steady state was established, the sample and the crucible had the same temperature. After a six-hour process, the thickness of the studied layer reached values from 3 to 6  $\mu\text{m}$ .

References:

1. Lloyd J. R., Tu K. N., Jaspal J. The physics and materials science of electromigration and thermomigration in solders //Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies. – CRC Press, 2004. – С. 844-867.

2. Gutfleisch O. et al. Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient //Advanced materials. – 2011. – Т. 23. – №. 7. – С. 821-842.

### **Архитектура сетевой контейнерной вычислительной среды для группового моделирования летательных аппаратов и отработки интеллектуализированных систем**

Шевадронов А.С., Бабиченко А.В.  
АО «РПКБ», г. Раменское, Россия

В данной работе рассмотрены проблемы построения моделей с учетом проблематики синхронизации моделей в распределенной вычислительной сети, предложено использовать централизованную базу данных для задач согласования потоков данных моделей в киберфизическом пространстве. Предлагается использовать архитектуру с технологиями виртуализации для масштабирования и минимизации взаимовлияния разных моделей летательных аппаратов. Рассмотрены существующие модели цифровых двойников на базе стенда МСКБО в рамках совместного проекта АО «РПКБ» и МГТУ им. Н.Э. Баумана. Предложены способы эффективной командной работы при необходимости работать дистанционно. Рассмотрен опыт работы со студентами МГТУ им Н.Э. Баумана в рамках образовательного проекта ИНОЦ «авионика» с использованием вышеуказанных технологий. Дополнительно, также описаны будущие перспективы развития стенда МСКБО как киберфизической системы.

Литература:

1. Бабиченко А.В., Сухомлинов А.Б., Земляной Е.С., Воробьев А.А., Тектов М.В., Кожин В.Р., Елесин И.А., Задорнова Т.И., Шевадронов А.С. Моделирование системы интеллектуальной поддержки экипажа // Авиакосмическое приборостроение. – 2018. № 12. – С. 35-43.

2. Бабиченко А.В., Земляной Е.С., Воробьев А.А., Елесин И.А., Задорнова Т.И., Шевадронов А.С. Разработка макета бортовой системы интеллектуальной поддержки летательного аппарата// Авиакосмическое приборостроение. – 2019. № 2. – С. 26-33.

3. Федосов Е.А. Основные направления формирования научно-технического задела в области бортового оборудования перспективных ВС // Материалы докладов 4-й Международной конференции «Перспективные направления развития бортового оборудования гражданских воздушных судов», г. Жуковский Московской обл., Дом ученых ФГУП «ЦАГИ», 2017. С. 6-14.

4. Shevadronov, A. S. Development of Methods for Integrating Expert Systems into Local Onboard Aircraft Network Computing Systems to Response the Challenges of AI Integration / A. S. Shevadronov // Наука, технологии и бизнес: сборник материалов II межвузовской заочной конференции аспирантов, соискателей и молодых ученых, Москва, 28–29 апреля 2020 года. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2020. – Р. 91-94.

5. Архитектура микросервисов//Хабр URL: <https://habr.com/ru/company/mailru/blog/320962/> (дата обращения: 30.01.2020).

## **Architecture of a network computing environment for group modeling of aircraft and testing of intelligent systems**

Shevadronov A.S., Babichenko A.V.  
JSC "RPKB", Ramenskoe, Russia

In this abstracts of the report, the problems of model construction are considered taking into account the problems of model synchronization in a distributed computer network, it is proposed to use a centralized database for the tasks of coordinating the data flows of models in the cyber-physical space. It is proposed to use architecture with virtualization technologies to scale and minimize the interaction of different models of aircraft. The existing models of digital twins based on the MSKBO testing bench are considered within the framework of a joint project of JSC "RPKB" and Bauman Moscow State Technical University. The methods of effective teamwork are proposed, if necessary, to work remotely. The experience of working with Bauman Moscow State Technical University students in the framework of the educational project INOC "Avionics" using the above technologies is considered. In addition, the prospects for the development of the MSKBO testing bench as a cyber-physical system are also described.

### References:

1. Babichenko A.V., Sukhomlinov A. B., Zemlyaniy E. S., Vorobyev A. A., Tektov M. V., Kozhin V. R., Elesin I. A., Zadornova T. I., Shevadronov A. S. Modeling of the intelligent crew support system // Aerospace instrumentation. - 2018. No. 12. - pp. 35-43.
2. Babichenko A.V., Zemlyaniy E. S., Vorobyov A. A., Elesin I. A., Zadornova T. I., Shevadronov A. S. Development of the layout of the onboard intelligent support system of the aircraft// Aerospace instrumentation. - 2019. No. 2. - pp. 26-33.
3. Fedosov E. A. Main directions of formation of scientific and technical reserve in the field of on-board equipment of promising aircraft / / Materials of reports of the 4th International Conference "Promising directions for the development of on-board equipment of civil aircraft", Zhukovsky, Moscow region, House of Scientists of FSUE "TsAGI", 2017. pp. 6-14.
4. Shevadronov, A. S. Development of Methods for Integrating Expert Systems into Local Onboard Aircraft Network Computing Systems to Meet the Challenges of AI Integration / A. S. Shevadronov / / Science, Technologies and Business: a collection of materials of the II interuniversity correspondence conference of graduate students, applicants and young scientists, Moscow, April 28-29, 2020. - Moscow: Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 2020. - P. 91-94.
5. Architecture of microservices // Habr URL: <https://habr.com/ru/company/mailru/blog/320962/> (accessed: 30.01.2020).

# Секция «Аспиранты и исследователи».

## Трек 2

### Section «Ph.D. Students and Researchers».

#### Track No.2

##### Задача дифракции электромагнитной волны на стенке резонатора с отверстием

Абгарян Г.В.

КФУ, г. Казань, Россия

Рассмотрим полубесконечный идеально проводящий волновод с бесконечно тонкой металлической диафрагмой, расположенной перед заглушкой. Область волновода, расположенная между заглушкой и диафрагмой, можно рассматривать как резонатор с отверстием в стенке, соответствующим отверстию диафрагмы.

Пусть на отверстие в стенке резонатора слева набегают собственная волна волновода. Требуется найти прошедшую (в область резонатора) и отраженную волны, возникающие в результате дифракции набегающей волны. При решении задачи примем ряд упрощающих предположений: свободные заряды и токи отсутствуют, среда линейная, однородная и изотропная, а поле гармонически зависит от времени.

Решение и исследование данной задачи методом сшивания [1] приводится в работе [2]. В настоящей работе задача дифракции сводится к краевой задаче для уравнения Гельмгольца относительно потенциальной функции поля в области резонатора. Для решения краевой задачи используем метод конечных элементов (МКЭ). В качестве базисных функций используются стандартные полиномы первой степени [3]. Полученное решение сравнивается с решением, полученным, ранее, методом сшивания. Показана хорошая согласованность этих методов.

Литература:

1. Миттра, Р. Аналитические методы теории волноводов / Р. Миттра, С. Ли. – Москва: Наука, 1974. – 327.
2. Abgaryan G.V., Pleshchinskii N.B. On Resonant Frequencies in the Diffraction Problems of Electromagnetic Waves by the Diaphragm in a Semi-Infinite Waveguide // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2020. – Vol.41, No.7. – P. 1325 – 1336.
3. Даутов, Р. З. Введение в теорию метода конечных элементов / Р.З. Даутов, М.М. Карчевский. – Казань: Казанский государственный университет, 2004. – 239.

##### The problem of diffraction of an electromagnetic wave on the wall of a resonator with a hole

Abgaryan G.V.

KFU, Kazan, Russia

Consider a semi-infinite ideally conducting waveguide with an infinitely thin metal diaphragm in front of a plug. The region of the waveguide located between the plug and the diaphragm can be considered as a resonator with a hole in the wall corresponding to the aperture of the diaphragm.

Let the natural wave of the waveguide run on the hole in the wall of the resonator from the left. It is required to find the transmitted (into the resonator region) and reflected waves arising from the diffraction of the incident wave. When solving the problem, we will accept a number of simplifying assumptions: there are no free charges and currents, the medium is linear, homogeneous and isotropic, and the field harmoniously depends on time.

The solution and study of this problem by the stitching method [1] is given in [2]. In this paper, the diffraction problem is reduced to a boundary value problem for the Helmholtz equation for the potential field function in the resonator region. To solve the boundary value problem, we use the finite element method (FEM). Standard polynomials of the first degree [3] are used as basis

functions. The solution obtained is compared with the solution obtained earlier using the stitching method. Good consistency of these methods has been shown.

References:

1. Mitra R. Analytical methods of the theory of waveguides / R. Mitra, S. Lee. - Moscow: Science, 1974. - 327.
2. Abgaryan G.V., Pleshchinskii N.B. On Resonant Frequencies in the Diffraction Problems of Electromagnetic Waves by the Diaphragm in a Semi-Infinite Waveguide // Lobachevskii Journal of Mathematics. - 2020. - Vol.41, No.7. - P. 1325 - 1336.
3. Dautov R.Z. Introduction to the theory of the finite element method / R.Z. Dautov, M.M. Karchevsky. - Kazan: Kazan State University, 2004. - 239.

#### **Анализ теплового состояния с использованием методики моделирования сопряженного теплообмена в системе вторичного воздуха газотурбинного двигателя**

<sup>1</sup>Беденко К.А., <sup>1</sup>Шипунов В.В., <sup>2</sup>Виноградов А.С.

<sup>1</sup>ПАО «ОДК-Кузнецов», <sup>2</sup>Самарский университет, г. Самара, Россия

В современных газотурбинных двигателях система вторичных потоков является одной из наиболее важных систем, оказывающих большое влияние на эффективность цикла. Воздушные системы двигателя взаимосвязаны и образуют единую систему внутренних воздушных потоков (СВВП), которая обеспечивает функционирование систем, агрегатов и устройств не только самого ГТД, но и самолета в целом [1]. Наиболее важными системами, использующие вторичный воздух, являются: система охлаждения турбин, система наддува уплотнений масляных полостей, система разгрузки подшипниковых опор, система противообледенения.

Геометрическая сложность конструкции и наличие центробежных эффектов от вращающихся деталей ротора делают задачу CFD моделирования течения и теплообмена в полостях трудозатратной и ресурсоёмкой. Чтобы преодолеть ограничения трехмерного CFD-анализа системы вторичного воздушного потока, для оптимизации проектирования системы используются коммерческие готовые и/или собственные инструменты моделирования систем на основе моделей 1D [2].

В работе рассматривался трёхвалный газотурбинный двухконтурный двигатель, пневмосистема которого включает в себя системы охлаждения турбины, наддува уплотнений маслополостей, разгрузки радиально-упорных подшипников, а также противообледенительную систему. Выполнен теплогидравлический расчёт двигателя по эксплуатационному циклу.

Для расчета гидравлических и тепловых характеристик воздуха во внутренних каналах использовалась программа, основанная на методе представления СВВП в виде графа [3]. Для расчета распределения расходов воздуха по каналам СВВП используются полуэмпирические зависимости, основанные на первом и втором законе Кирхгофа, а также на замыкающем уравнении, связывающем потери давления с гидравлическим сопротивлением. Для определения теплового состояния деталей двигателя применялся численный анализ, граничными условиями для которого использовались данные, полученные из гидравлического расчета. Особенностью данного расчёта является то, что при задании граничных условий для одномерного анализа учитывались результаты сопряженного теплогидравлического расчёта в трехмерной постановке. В рамках анализа результатов расчёта определено тепловое состояние деталей, которое в дальнейшем будут учитываться при термомеханическом анализе конструкции.

Литература:

1. Nasti, A/ Process automation for aero engine secondary air system seal design/ A. Nasti // Proceedings of ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. – 2020. – GT2020-15623.
2. Hunt, D/ Modelling conjugate heat transfer within a gas turbine secondary air system using thermo-fluid system simulation / D. Hunt, Y. Uuan // Proceedings of ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. – 2020. – GT2020-14202.

3. Тисарев А.Ю. Методика расчета системы охлаждения опоры турбины авиационного двигателя // Международный научно-технический форум, посвященный 100-летию ОАО Кузнецов и 70-летию СГАУ. — 2012. — С. 26-27

### **Thermal state analysis using the technique of modeling conjugate heat transfer in the secondary air system of a gas turbine engine**

<sup>1</sup>Bedenko K.A., <sup>1</sup>Shipunov V.V., <sup>2</sup>Vinogradov A.S.

<sup>1</sup>PJS “UEC-Kuznetsov”, <sup>2</sup>Samara University, Samara, Russia

In modern gas turbine engines, the secondary flow system is one of the most important systems that have a great impact on the efficiency of the cycle. The engine's air systems are interconnected and form a single system of internal air flows, which ensures the functioning of systems, aggregates and devices not only of the gas turbine engine itself, but also of the aircraft as a whole [1]. The most important systems that use secondary air are: the turbine cooling system, the pressurization system for oil cavity seals, the bearing support unloading system, and the anti-ice system.

The geometric complexity of the design and the presence of centrifugal effects from rotating rotor parts make the task of CFD modeling of flow and heat exchange in cavities labor-intensive and resource-intensive. To overcome the limitations of the 3D CFD analysis of secondary air flow system, commercial off-the-shelf and/or inhouse 1D model-based system simulation tools are deployed to optimize the system design [2].

The paper considers a three-shaft gas turbine two-circuit engine, the pneumatic system of which includes turbine cooling systems, pressurization of oil cavity seals, unloading of angular contact bearings, as well as an anti-icing system. The thermohydraulic calculation of the engine according to the operating cycle is performed.

To calculate the hydraulic and thermal characteristics of the air in the internal channels, a program based on the method of representing the system of internal air flows in the form of a graph was used [3]. To calculate the distribution of air flow rates through the channels of the internal air flow system, semi-empirical dependencies are used based on the first and second Kirchhoff's law, as well as on the closing equation linking pressure losses with hydraulic resistance. To determine the thermal state of the engine parts, numerical analysis was used, the boundary conditions for which were used data obtained from hydraulic calculation. The peculiarity of this calculation is that when setting the boundary conditions for one-dimensional analysis, the results of the coupled thermal-hydraulic calculation in a three-dimensional formulation were taken into account. As part of the analysis of the calculation results, the thermal state of the parts is determined, which will be taken into account in the thermomechanical analysis of the structure in the future.

### **Численное моделирование дозвукового обтекания цилиндрического образца химически неравновесной плазмой**

Брызгалов А.И., Якуш С.Е., Колесников А.Ф., Васильевский С.А.

ИПМех РАН, г. Москва, Россия

Одной из ключевых задач при разработке космических летательных аппаратов является проектирование теплозащитного покрытия для защиты корабля от перегрева и разрушения при входе в плотные слои атмосферы Земли и других планет. Основным инструментом исследования в данной теме является эксперимент. В ИПМех РАН имеется УНУ плазматрон ВГУ-4. Он позволяет качественно выяснить эрозионную и тепловую стойкость образца и количественно определить тепловые потоки с поверхности. Химический состав на поверхности вносит существенный вклад в эрозионный процесс материала, и он находится только расчётным путём при учёте химической неравновесности. В настоящее время расчёт течения производится в предположении о равновесности плазмы [1], а неравновесность учитывается только в пограничном слое у поверхности.

В данной работе описано моделирование двумерного химически неравновесного обтекания воздушной плазмой цилиндрического образца с определением химического состава и тепловых потоков вдоль всей поверхности. Расчёт проводится на прямоугольной неравномерной сетке с аппроксимацией вязких потоков на границах ячеек по схеме SLAU [2]. Воздушная плазма состоит из 11 компонент с учётом однократной ионизации. Изменение химического состава происходит неравновесно в 32 химических реакциях.

Расчётный кинетический модуль использовался и ранее для моделирования течения лагранжевой частицы за ударной волной [3], источники членов в уравнениях сохранения компонент и энергии считаются отдельным полшагом как жесткая система ОДУ с численным расчетом якобиана по схеме семейства Адамса. Диффузионные потоки определяются на основе соотношений Стефана-Максвелла [4], коэффициенты переноса рассчитываются сразу для всей смеси по полуэмпирическим формулам, введенным для химически неравновесной воздушной плазмы [5]. В качестве граничных условий задавались химический состав, давление, температура и скорости на срезе сопла, полученные из расчёта течения в разрядном канале плазмотрона. Образец имеет водоохлаждаемую до  $T=300\text{K}$  стенку, химический состав на поверхности находится из соотношений Стефана-Максвелла, где диффузионные скорости рекомбинирующих компонент зависят от степени каталитичности, диффузионные скорости ионов, электрона и NO нулевые. Градиенты температуры и концентраций на поверхности аппроксимируются с первым порядком точности.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 19-31-90114 и в рамках госзадания №АААА-А20-120011690135-5

Литература:

1. Соколова И.А., Васильевский С.А., Андриатис А.В. Описание пакета программ SoVa, предназначенного для расчёта равновесного состава и коэффициентов переноса низкотемпературной плазмы в высших приближениях метода Чепмена-Энскога // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. Т.3 2005.

2. K.Kitamura, A.Hashimoto Reduced dissipation AUSM-family fluxes: HR-SLAU2 and HR-AUSM-up for high resolution unsteady flow simulations// Computers and Fluids 126 (2016) pp. 41-57.

3. Брызгалов А.И. Численное моделирование течения термически и химически неравновесного воздуха за фронтом ударной волны // Вестник МГТУ им. Баумана, №3(96) 2021.

4. Колесников А.Ф., Тирский Г.А. Уравнения гидродинамики для частично ионизованных многокомпонентных смесей газов с коэффициентами переноса в высших приближениях// Сб. Молекулярная газодинамика. - Наука. 1982. с. 20-44.

5. Андриатис А.В., Жлуктов С.А., Соколова И.А. Транспортные коэффициенты смеси воздуха химически неравновесного состава // Математическое моделирование. №1, Т. 4. 1992.

### **Numerical simulation of a subsonic flow of a chemically nonequilibrium plasma around a cylindrical sample**

Bryzgalov A.I., Yakush S.E., Kolesnikov A.F., Vasilevski S.A.

IPMech RAS, Moscow, Russia

One of crucial problems in space ships design is development of TPM for proofing from overheat of vehicle and from breaking down by enter in Earth and other planets atmosphere. Experiment is a main tool for investigation. IPMech RAS has a experimental facility IPG-4. It permits to define erosion and thermal resistance of material and to calculate thermal fluxes from surface. Chemical composition onto surface has a big influence in erosion process of the matter and it can be defined only by means of calculations allowing for chemical nonequilibrium. Currently flow is predicted as chemicaly equilibrium plasma [1], but nonequilibrium is introduced in laminar boundary layer.

This paper describes 2D chemically nonequilibrium flow of air-plasma about cylindrical bluff-body with chemical mixture and heat flux onto all surface defining. Simulation does on cartesian unstructured grid with SLAU-form fluxes onto cell faces [2]. Air plasma consists from 11 components with with first-order ionization. 32 chemical reactions describe mixture. Kinetic simulation-block was later used in lagrange particle after shock wave prediction [3], source terms in conservation equations for mass fractions and energy are evaluated as separate halfstep for stiff ODE with numerical calculation of jacobian by means of Adams-family scheme. Diffusion fluxes are defined from Stefan-Maxwell relations [4], transport coefficients are calculated for all mixture by semiempirical expressions for chemical nonequilibrium air plasma [5]. Boundary conditions are chemical components, pressure, temperature and velocity in nozzle exit section, that was obtained

in inductively torch simulations. Test article has a water cooled surface with  $T=300K$ , chemical composition is calculated from Steffan-Maxwell relations and diffusion velocities of recombined components depend from catalytic constant. Diffusion velocities for ions, electron and NO are zero. Temperature and chemical concentrations are approximated with first-order.

Work is supported with RFBR grant # 19-31-90114 and state assignment AAAA-A20-120011690135-5

References:

1. Sokolova I.A., Vasilevski S.A., Andriatis A.V. Description of the SoVa software package designed to calculate the equilibrium composition and transport coefficients of low-temperature plasma in higher approximations of the Chapman-Enskog method // Physicochemical kinetic in gas dynamic. 3. 2005.

2. K.Kitamura, A.Hashimoto Reduced dissipation AUSM-family fluxes: HR-SLAU2 and HR-AUSM-up for high resolution unsteady flow simulations// Computers and Fluids 126 (2016) pp. 41-57.

3. Bryzgalov A.I. Numerical simulation of the flow of thermally and chemically nonequilibrium air behind the shock front // Vestnik MSTU Baamana, №3(96) 2021.

4. Kolesnikov A.F., Tirskiy G.A. Hydrodynamic equations for partially ionized multicomponent gas mixtures with transfer coefficients in higher approximations// Coll. molecular gasdynamic. - Nauka. 1982. pp. 20-44

5. Andriatis A.V., Zhlukov S.A., Sokolova I.A. Transport coefficients of a mixture of chemically nonequilibrium air composition // Matemathical simulation. 1(4). 1992.

### **Численное моделирование внутрикамерных процессов в бесплолом РДТТ при выходе на режим работы**

Гайдаров Д.Д., Соцков И.А.

МАИ, г. Москва, Россия

Численное исследование внутрикамерных процессов (внутренней баллистики) является одной из главных задач при разработке и проектировании ракетного двигателя твердого топлива (РДТТ), в том числе и бесплового РДТТ. В рамках этой задачи определяются основные рабочие параметры ракетного двигателя – тяга ракетного двигателя, массовый секундный расход продуктов сгорания, постоянная времени (время релаксации) камеры сгорания, силовое и тепловое нагружение камеры сгорания и заряда твёрдого топлива и др.

Современный РДТТ – сложная техническая система, в которой одновременно протекает ряд взаимосвязанных нестационарных физико-химических процессов, таких как: - срабатывание воспламенительного устройства; - прогрев, зажигание и последующее горение заряда твёрдого топлива; - газодинамическое течение в камере сгорания; - разгерметизация камеры сгорания и вылет заглушки; - напряжённо-деформированное и тепловое состояние заряда твёрдого топлива и корпуса ракетного двигателя.

Численное исследование внутрикамерных процессов в бесплолом РДТТ имеет свои особенности. На первый взгляд бесплового ракетный двигатель является более простой с технологической точки зрения конструкцией (как такового соплового блока здесь нет). Однако провести внутриваллистическое проектирование с требуемой точностью для такого типа двигателя по существующим в отрасли методикам практически невозможно. Это, в первую очередь, связано с отсутствием фиксированного в пространстве критического сечения в проточной части камеры сгорания бесплового РДТТ. Как такового классического сопла ракетного двигателя здесь нет, а, значит, и нет возможности корректно рассчитать параметры потока продуктов сгорания по известным аналитическим зависимостям и даже ряду численных методик.

В предлагаемой работе предпринята попытка численного исследования внутрикамерных процессов в бесплолом РДТТ с учётом особенностей этого типа ракетных двигателей. Будет рассматриваться сопряжённая задача, включающая в себя: - описание процесса срабатывания воспламенительного устройства; - прогрев, воспламенение и последующее нестационарное и турбулентное горение заряда твёрдого топлива; - нестационарное гомогенно-гетерогенное течение воздуха и продуктов сгорания в камере сгорания; - описание движения заглушки камеры сгорания. Каждая из подзадач рассматривается во

взаимосвязи и разрешается одновременно – на одном шаге интегрирования по времени. Также будут учитываться другие особенности процесса срабатывания бесспорного РДТТ.

Литература:

1. Давыдов Ю.М., Давыдова И.М., Егоров М.Ю., Липанов А.М. и др. Численное исследование актуальных проблем машиностроения и механики сплошных и сыпучих сред методом крупных частиц. Т. 1. – Т. 5. – М.: НАИИ РФ, 1995. – 1658 с.

2. Давыдов Ю.М., Егоров М.Ю. Численное моделирование нестационарных переходных процессов в активных и реактивных двигателях. – М.: НАИИ РФ, 1999. – 272 с.

3. Давыдов Ю.М., Давыдова И.М., Егоров М.Ю. Совершенствование и оптимизация авиационных и ракетных двигателей с учётом нелинейных нестационарных газодинамических эффектов. – М.: НАИИ РФ, 2002. – 303 с.

### **Numerical modeling of intrachamber processes in a nozzleless solid propellant rocket when entering the operating mode**

Gaydarov D.D., Sotskov I.A.

MAI, Moscow, Russia

Numerical investigation of intra-chamber processes (internal ballistics) is one of the main tasks in the development and design of a solid propellant rocket engine (solid propellant rocket engine), including a nozzleless solid propellant rocket motor. Within the framework of this task, the main operating parameters of the rocket engine are determined - the thrust of the rocket engine, the mass flow rate of combustion products per second, the time constant (relaxation time) of the combustion chamber, the force and thermal loading of the combustion chamber and the charge of solid fuel, etc.

A modern solid propellant rocket motor is a complex technical system in which a number of interconnected non-stationary physical and chemical processes take place simultaneously, such as: - triggering of an ignition device; - heating, ignition and subsequent combustion of a solid fuel charge; - gas-dynamic flow in the combustion chamber; - depressurization of the combustion chamber and the departure of the plug; - stress-strain and thermal state of the solid fuel charge and the rocket engine body.

The numerical study of intrachamber processes in a nozzleless solid propellant rocket has its own peculiarities. At first glance, a nozzleless rocket engine is a simpler design from a technological point of view (as such, there is no nozzle block here). However, it is practically impossible to carry out intra-ballistic design with the required accuracy for this type of engine using the existing methods in the industry. This is, first of all, due to the absence of a critical section fixed in space in the flow path of the combustion chamber of a nozzleless solid propellant rocket. As such, there is no classical rocket engine nozzle here, which means that it is not possible to correctly calculate the parameters of the flow of combustion products using known analytical relationships and even a number of numerical methods.

In the proposed work, an attempt is made to numerically study the intrachamber processes in a nozzleless solid propellant rocket engine, taking into account the features of this type of rocket engines. An associated task will be considered, including: - a description of the process of triggering the ignition device; - heating, ignition and subsequent unsteady and turbulent combustion of a solid fuel charge; - unsteady homogeneous-heterogeneous flow of air and combustion products in the combustion chamber; - a description of the movement of the combustion chamber plug. Each of the subproblems is considered in interrelation and is solved simultaneously - at one step of integration over time. Also, other features of the nozzleless solid propellant rocket motor actuation process will be taken into account.

### **Выбор закона регулирования лопастей турбовинтового аварийного ветрогенератора**

Гарипов И.Р., Жеребцов А.А., Саяхов И.Ф., Жарков Е.О.

УГАТУ, г. Уфа, Россия

ТВАГ устанавливается в самолет для обеспечения электрической энергии, в случае отказа основных источников питания энергосистемы самолета. Набегающий поток воздуха используется для вращения лопастей турбины, которая, в свою очередь, приводит в действие электромеханический генератор. Воздушная турбина имеет две лопасти изменяемого шага (профиль ЦАГИ-831) и встроенную систему регулирования частоты вращения ротора, что

позволяет обеспечивать постоянную частоту вращения ротора при различных скоростях набегающего потока. Основные параметры ТВАГ на номинальном режиме работы: частота вращения  $n=8000$  об/мин; мощность  $N_n=15000$  Вт; механический КПД  $\eta_{\text{мех}}=0,9$ , электрический КПД  $\eta_{\text{эл}}=0,8$ .

Для лопасти ТВАГ, в диапазоне высот от 0 до 7620 метров и скоростей от 230 до 830 км/ч, проведен расчет оптимального угла установки лопастей, с применением программного комплекса ANSYS и мощностей вычислительного кластера УГАТУ. Методика выбора оптимального угла установки базировалась на определении крутящего момента, действующего на лопасти относительно оси Z. Расчет проводился в псевдо-стационарной постановке, на секторе с углом разворота  $180^\circ$ . Моделирование набегающего потока осуществляется посредством задания полных параметров на входе и статических на выходе из расчетной области. Параметры для различных высот и скоростей полета определялись по ГОСТ 4401-81 и известным соотношениям термодинамики.

Расчетная модель состояла из двух областей: стационарной с условием адиабатной стенки на внешних границах и области с подвижной системой координат, вокруг лопасти. Поверхности лопатки и корпуса моделировались как непроницаемые стенки с условием прилипания, шероховатостью поверхности 6,2 мкм.

В ходе расчетов по определению оптимального угла установки, изменению подвергался угол установки лопатки  $\varphi$ , в диапазоне от  $22,67^\circ$  до  $56,45^\circ$ . Оценка погрешностей, сетки конечных объемов, проводилась на сетках размерностью от 1 до 3,5 млн ячеек. Погрешность между решениями составила менее 3%. В качестве расчетной использовалась сетка размерностью 3,5 млн ячеек, обеспечивающее значение  $Y^+ \sim 1$ , при модели турбулентности "k-w SST".

Полученные зависимости  $M=f(\varphi)$  аппроксимировались полиномом 4-й степени с величиной достоверности более 0,98. Анализ полученных зависимостей выявил следующие закономерности: с ростом угла установки  $\varphi$  возрастает сила, с которой воздушный поток действует на лопасть; максимальное значение крутящего момента достигается при угле установки в  $\varphi=56,45^\circ$ . Мощность, производимая лопастью при постоянном угле установки, падает с ростом высоты полета.

Проведенное расчетное исследование позволило выбрать закон регулирования для угла установки лопасти. В целях обеспечения работы ветротурбины в номинальном режиме, с ростом скорости полета на 150 м/с необходимо увеличение угла установки лопасти примерно на  $13^\circ$ . Изменение высоты полета от 0 до 7620 м ведет к требованию увеличения угла установки лопасти на  $5^\circ$ . Для низких скоростей полета, с ростом высоты требуется большее увеличение угла установки лопасти. Известный закон регулирования позволил осуществить проектирование центробежного регулятора угла установки.

1. Методы проектирования перспективных энергосистем силового привода летательных аппаратов / Под ред. А.М. Матвеевко. М.: Издательство МАИ-ПРИНТ, 2010.

2. Кашин Я.М., Кашин А.Я., Пауков Д.В. Обоснование и разработка перспективных конструкций генераторных установок для систем автономного электроснабжения // Известия вузов. Электромеханика. 2012. № С. 46–53.

### **Choice of the regulation law of ram air turbine**

Garipov I.R., Zherebtsov A.A., Sayahov I.F., Zharkov E.O.

USATU, Ufa, Russia

The RAT is installed in the aircraft to provide electrical and hydraulic power if the primary sources of aircraft power are lost. The incoming airflow is used to rotate the ram turbine blades, which in turn operates electrical generator. Wind turbine has two variables pitch blades (airfoil TSAGI-831) and integrated regulation system of rotation speed, that allows the rotor to provide constant angular velocity in variable speed of incoming airflow. Technical parameters of RAT in main mode: angular velocity  $n=8000$  rpm; power  $N_m=15000$  Wt; mechanical efficiently  $\eta_m=0,9$ ; electrical efficiency  $\eta_e=0,8$ .

Investigation was carried out for blades of RAT, in the range of altitude from 0 to 7620 km and speeds from 230 kmph to 830 kmph, with using the software package ANSYS and the power of the USATU's computing cluster. The method of choosing of optimal setting angle  $\varphi$  was based on

determining of the torque acting on blades relative to the Z axis. The simulation was carried out pseudo-transient setting, in the sector with 180 ° turn angle. Incoming airflow is calculated by specifying total parameters at the inlet boundary and static parameters at outlet boundary. Parameters for different altitudes and fly speeds were determined according to GOST 4401-81 and known expressions of thermodynamics.

Calculation model consisted of two domains: stationary with the condition of adiabatic on the outside walls and domain around the blade with moving coordinate system. The surface of blade and hub were modeled as impermeable walls with a condition of slipping, roughness of surface 6,2 mkm.

During simulation to determine the optimal setting angle  $\varphi$ , the setting angle of blade was changed from 22,67° to 56,45°. The estimate of the calculation error of mesh was carried out on meshes with dimensions of 1 to 3,5 million cells. The error between solution was less than 3%. As design model was used mesh with sizing 3,5 million elements, which provides a value  $Y^+ \sim 1$  on blade surface, in the turbulence model "k-w SST".

The resulting dependencies  $M=f(\varphi)$  were approximated by polynomial, of the 4th degree, with a reliability more than 0.98. The analysis of the obtained dependencies has identified the following patterns: with the growth of setting angle the force which operate on blades was increased. The maximum torque is reached at setting value is  $\varphi=56,45^\circ$ . The power produced by the blade at a constant setting angle was decreased with increasing flight altitude.

The performed computational study made possible to choose the control law for the blade setting angle. In order to ensure the operation of the wind turbine in the nominal mode: with an increase in flight speed by 150 m / s, it is necessary to increase the blade setting angle by about 13°, the change in flight altitude from 0 to 7620 m leads to the requirement to increase the blade angle by 5°. For low flight speeds, with increasing altitude, a greater increase in the blade angle is required. The well-known regulation law made it possible to design a centrifugal angle regulator.

#### **Математическое моделирование рабочего процесса в прямоточном двигателе гипотетического космического летательного аппарата, предназначенного для работы в атмосфере Юпитера**

Грибиненко Д.В., Мякочин А.С., Молчанов А.М., Янышев Д.С.  
МАИ, г. Москва, Россия

В последнее время в связи с продолжающимся освоением космоса, и в частности других планет солнечной системы, актуальной становится задача использования материалов, находящихся на этих планетах в качестве топлива для силовой установки аппарата предназначенного для передвижения в атмосфере планеты. Использование солнечной энергии не всегда представляется возможным, например, при нахождении аппарата под слоями атмосферы, не пропускающими солнечный свет.

В данной работе рассматривается возможность функционирования прямоточного воздушно-реактивного двигателя в атмосфере Юпитера. Предполагается, что в качестве горючего будет использоваться водород из атмосферы Юпитера, а в качестве окислителя - запасённый в аппарате кислород.

В работе представлена математическая модель и численный метод расчёта высокоскоростных турбулентных течений с учётом неравновесности химических реакций [1] в модификации для неструктурированной сетки. В данном методе используется полная система уравнений Навье-Стокса (Рейнольдса-Фавра), явно- неявная схема, с представлением источников химических компонентов в неявной форме, и решается полностью связанная система, включая все уравнения переноса. Для представления конвективных потоков используется модифицированное расщепление Стегера-Уорринга.

Проведена верификация метода с помощью сравнения с результатами экспериментальной работы Забайкина В.А. [2], выполненной в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН, посвящённой сверхзвуковой подаче водорода в камеру сгорания прямоточного воздушно-реактивного двигателя, а также экспериментальной работы Берроуза и Куркова [3], посвящённой экспериментальному исследованию сверхзвукового течения воздуха, в который осуществляется параллельный впрыск водорода.

С помощью разработанного в МАИ программного комплекса «Universe CFD», реализующего данный метод, проведён расчёт рабочего процесса в тракте прямоточного воздушно-реактивного двигателя в атмосфере Юпитера.

Литература:

1. Быков Л.В., Молчанов А.М., Янышев Д.С. Численный метод расчета сверхзвуковых турбулентных течений с химическими реакциями // Вестник МАИ. 2010. Т. 17. No 3. С. 108–119.
2. Забайкин В.А. Газодинамика горения в открытом потоке и каналах переменной геометрии // Дисс. д.т.н. Новосибирск. 2012. 256 с.
3. Burrows M.C., Kurkov A.P. Analytical and Experimental Study of Supersonic Combustion of Hydrogen in a Vitiated Airstream. // NASA-TM-X-2828, 1973. 34 p.

#### **Mathematical modeling of a hypothetical spacecraft ramjet operation in Jovian atmosphere**

Gribinenko D.V., Myakochin A.S., Molchanov A.M., Yanyshv D.S.

MAI, Moscow, Russia

In recent years, due to the continued exploration of space and especially other planets of the Solar system, it is becoming important to investigate the problem of utilization of natural resources on these planets as a fuel for power plants of planetary spacecraft. Utilization of solar energy in this case is not always applicable as a hypothetical spacecraft could be isolated from the solar light.

This paper considers the possibility of operation of a ramjet in Jovian atmosphere. In this case hydrogen from the Jovian atmosphere could be taken as a fuel, and an oxidizer could be carried aboard a spacecraft.

The paper presents a mathematical model and a numerical method for simulation of high speed turbulent flows with non-equilibrium chemical reactions on unstructured grids. The method uses fully coupled Reynolds-Favre averaged Navier-Stokes system of equations [1], semi-explicit numerical scheme with implicit chemical source term. Convective fluxes are resolved via modified Steger-Warming splitting.

The model and the method were verified using experimental data by Zabaikin [2] (Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS) for supersonic hydrogen flow in combustion chamber of a jet engine and Burrows and Kurkov [3] data for supersonic airflow with parallel streamwise hydrogen injection.

The described simulation method was implemented via Universe CFD CFD code developed in MAI to perform simulation of operation process of a ramjet in Jovian atmosphere.

References:

1. Bykov L.V., Molchanov A.M., Yanyshv D.S. Numerical method for supersonic turbulent reacting flow simulations // Vestnik MAI. 2010, vol. 17, no. 3, pp. 108-119
2. Zabaikin V.A. Gas dynamics of combustion in open flow and in channels of alternating geometry // Doctoral thesis. Novosibirsk. 2012. 256 p.
3. Burrows M.C., Kurkov A.P. Analytical and Experimental Study of Supersonic Combustion of Hydrogen in a Vitiated Airstream. // NASA-TM-X-2828, 1973. 34 p.

#### **Численное моделирование аэроупругости крыла с использованием двустороннего связывания методов конечных элементов и контрольных объемов**

Гунчин В.К., Февральских А.В., Больших А.А., Колпаков А.М.

МАИ, г. Москва, Россия

Определение нагрузок, действующих на самолет, является одной из основных задач проектирования объектов авиационной техники. Особый интерес на начальных этапах проектирования представляет расчет аэродинамических нагрузок, действующих на самолет в полете. Задача осложняется, когда речь идет о процессах, протекающих нелинейно, процессах, моделирование которых возможно только в динамической постановке. К таким процессам относятся явления флаттера и бафтинга, определяемые свойствами аэроупругости конструкции. Для численного моделирования аэроупругого взаимодействия крыла (средняя аэродинамическая хорда - 0.3445 м, удлинение крыла - 4.21) с набегающим потоком газа была реализована двусторонняя связь решателей Siemens Star CCM+ и Dassault Systemes Simulia Abaqus. Использовалась постановка задачи, предложенная в эксперименте

HIRENASD. Численное моделирование аэродинамики осуществлялось с использованием RANS-подхода, модели турбулентности k- $\epsilon$  и модели пристеночного течения типа Low Y+. Параметры моделирования соответствовали таковым в эксперименте №271 (число Маха – 0,8, число Рейнольдса – 23.5E6). Количество элементов контрольно-объемной гексаэдрической усеченной сетки 4,9 млн единиц; сеточная модель для реализации метода конечных элементов содержит 191 тыс. тетраэдрических элементов (плотность материала – 7.93E-009 t/m<sup>3</sup>, модуль упругости – 181300 МПа, коэффициент Пуассона – 0.264). Конечно-элементная модель создана с учетом конструктивных особенностей экспериментальной установки. Деформация расчетной контрольно-объемной сетки осуществлялась на каждом временном шаге вслед за деформацией конечно-элементной модели. Получены характеристики колебаний конечно-элементной модели, которые затем сравнивались с экспериментальными данными. Установлены аэродинамические характеристики модели в абсолютно жестком и напряжённо-деформированном состоянии. Анализ результатов численного моделирования показывает, что использование связки решателей Siemens Star CCM+ Dassault Systemes Simulia Abaqus позволяет получить результаты, которые хорошо согласуются с опорными экспериментальными данными, как по величине коэффициента подъемной силы, так и по частотам первых двух мод колебаний. В дальнейших работах планируется применять изложенный подход для моделирования аэроупругого состояния крыльев проектируемых летательных аппаратов.

Литература:

1. Chwalowski, Pawel; Heeg, Jennifer (2013). FUN3D Analyses in Support of the First Aeroelastic Prediction Workshop. doi:10.2514/6.2013-785
2. B.B. Prananta, J. van Muijden and B.J.G. Eussen (2012). Transonic unsteady aerodynamic analysis of HIRENASD wing oscillating in flexible modes. NLR-TP-2012-476
3. Wieseman, Carol D. (2013). Structural Dynamics Modeling of HIRENASD in support of the Aeroelastic Prediction Workshop. doi:10.2514/6.2013-1801
4. H. Korsch; A. Dafnis; H.-G. Reimerdes (2009). Dynamic qualification of the HIRENASD elastic wing model, 13(2-3), 130–138. doi:10.1016/j.ast.2008.08.002

#### **Numerical simulation of aeroelasticity of wing using the two-way coupling of finite volume method and finite elements methods**

Gunchin V.K., Fevral'skikh A.V., Bolshikh A.A., Kolpakov A.M.  
MAI, Moscow, Russia

The determination of loads acting on an aircraft in flight is one of the main problems of aviation technic design. This problem is sufficiently non-linear because the wing is the elastic structure that interacts with turbulent air flow. The aeroelasticity of the wing shows itself in such phenomena as flutter and buffet. The coupled using of finite volume method (FVM) and finite elements method (FEM) is one of the effective approach to determination the aerodynamics characteristics of wing with taking in account the non-linear deformation of wing construction.

In present study the two-way coupling of Siemens Star CCM+ and Dassault Systemes Simulia Abaqus software is used for the numerical simulation of aeroelastic wing-flow interaction (mean aerodynamic chord – 0.3445 m, wing span – 1.28571 m). The statement of HIRENASD experiment is applied as the conditions of simulation (Mach number – 0,8, Reynolds number – 23.5e6). The numerical simulation of aerodynamics is carried out using URANS approach with k-epsilon turbulence model and Low y+ wall functions. The number of cells of the finite volume hexahedral cut-cell mesh is around 4.9 mln; number of cells of the finite elements tetrahedral mesh is around 191 thousand (density of wing material – 7.93E-009 t/m<sup>3</sup>, modulus of elasticity – 181300 МПа, the Poisson ratio 0.264). The finite element mesh model replicates the mane constructive elements of experiment object. The deformation of finite volume mesh model is completed on every time-step after solving the stress-strain state using finite element method.

The aerodynamic characteristics and the characteristics of wing vibration determinate by results of numerical simulation is in a good agreement with the experimental data. The results of numerical simulation of wing aeroelasticity obtained in present study show that the two-way coupling of Siemens Star CCM+ and Dassault Systemes Simulia Abaqus software is the effective method of determination of non-linear aerodynamic loads acting on the elements of construction of aircraft.

#### References:

1. Chwalowski, Pawel; Heeg, Jennifer (2013). FUN3D Analyses in Support of the First Aeroelastic Prediction Workshop. doi:10.2514/6.2013-785
2. B.B. Prananta, J. van Muijden and B.J.G. Eussen (2012). Transonic unsteady aerodynamic analysis of HIRENASD wing oscillating in flexible modes. NLR-TP-2012-476
3. Wieseman, Carol D. (2013). Structural Dynamics Modeling of HIRENASD in support of the Aeroelastic Prediction Workshop. doi:10.2514/6.2013-1801
4. H. Korsch; A. Dafnis; H.-G. Reimerdes (2009). Dynamic qualification of the HIRENASD elastic wing model, 13(2-3), 130–138. doi:10.1016/j.ast.2008.08.002

#### **Математическое моделирование влияния герметика на сборку авиационных конструкций**

Елисеев А.А., Лупуляк С.В., Григорьев Б.С., Шиндер Ю.К.  
СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Нанесение герметика между собираемыми деталями является неотъемлемой процедурой при сборке современных авиационных конструкций. В первую очередь, герметик призван заполнить пустоты между деталями и тем самым уберечь соединение от механического, абразивного, коррозионного и иных воздействий [1]. Также наличие герметика позволяет удалить из соединения стружку, которая образуется в результате сверления отверстий для крепежных элементов (болтов, заклепок) и присутствие которой может привести к развитию трещин из-за концентрации механических напряжений.

Одним из наиболее современных подходов к моделированию влияния герметика на сборку является подход, предложенный в работе [2]. В нем впервые в задачах сборки была использована так называемая двусторонняя постановка задачи [3], в рамках которой учитывается взаимное влияние деформаций деталей и течения герметика друг на друга. При помощи данного подхода в работе продемонстрировано, как различные параметры сборочного процесса влияют на характер протекания процесса и на конечный результат сборки. В частности, было рассмотрено влияние начального зазора между деталями, типа устанавливаемых крепежных элементов, а также параметров нанесения герметика.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90023.

#### Литература:

1. [https://www.gore.com/sites/g/files/ypypipe116/files/2016-09/Form-in-place%20Seals\\_0.pdf](https://www.gore.com/sites/g/files/ypypipe116/files/2016-09/Form-in-place%20Seals_0.pdf).
2. Eliseev A., Lupuleac S., Grigor'ev B., Shinder J. and Bouriquet J. "Numerical Simulation of Aircraft Assembly Process with Presence of Sealant", SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility 3(3):1137-1145 (2021).
3. Shvarts A.G. and Yastrebov V.A. "Fluid flow across a wavy channel brought in contact", Tribology International 126:116–126 (2018).

#### **Mathematical modeling of sealant influence on the assembly process**

Eliseev A.A., Lupuleac S.V., Grigor'ev B.S., Shinder J.K.  
SPbPU, Saint-Petersburg, Russia

Application of sealant is an essential procedure in aircraft assembly nowadays. First, the presence of sealant helps to protect the aircraft from several destructive factors such as abrasion, corrosion and others [1]. Also the presence of sealant allows to remove cutting chips from the junction, which appear after holes reaming and presence of which may lead to development of cracks caused by concentration of mechanical stresses.

An approach introduced in paper [2] may be considered as one of the most modern approaches to modeling influence of sealant on the assembly process. So called two-way formulation [3] was applied there, first-ever in context of assembly modeling, when mutual influence of parts deformations and sealant flow is considered. In this paper this approach is used to demonstrate how different parameters of the assembly process influence the process itself and the assembly results. In particular, influence of initial gap between parts, type of fasteners and parameters of sealant application was investigated.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 20-38-90023.

#### References:

1. [https://www.gore.com/sites/g/files/ypypipe116/files/2016-09/Form-in-place%20Seals\\_0.pdf](https://www.gore.com/sites/g/files/ypypipe116/files/2016-09/Form-in-place%20Seals_0.pdf)
2. Eliseev A., Lupuleac S, Grigor'ev B., Shinder J. and Bouriquet J. "Numerical Simulation of Aircraft Assembly Process with Presence of Sealant", SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility 3(3):1137-1145 (2021).
3. Shvarts A.G. and Yastrebov V.A. "Fluid flow across a wavy channel brought in contact", Tribology International 126:116–126 (2018).

#### **Применение конечно-элементного моделирования к задаче определения гидродинамического шума, генерируемого локальной неоднородностью**

Еремеев В.О., Суворов А.С., Шапошников В.А., Балакирева Н.В.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Ввиду значительного различия пространственно-временных масштабов звуковых и гидродинамических волн, задачу определения гидродинамического шума принято разделять на задачу определения акустических источников шума (гидродинамическую) и задачу определения переизлучения этих источников поверхностью обтекаемого упругого тела (акустическую). Наиболее распространены интегральные методы решения акустической задачи – Кирхгофа и FW-H [1,2]. Однако они имеют ряд недостатков, среди которых наиболее критичные это ограничение на геометрию (функцию Грина) и невозможность учесть резонансное усиление гидродинамического шума (упругость тела).

Разработанный в ИПФ РАН метод конечно-элементного моделирования гидродинамического шума [3,4] позволяет снять данные ограничения. Он основан на совместном решении уравнения Гельмгольца и уравнений теории упругости, в котором акустическое излучение определяется как результат рассеяния турбулентного псевдозвука на поверхности тела. В качестве гидродинамических источников метод использует тензор напряжений Лайтхилла, что позволяет подавить нефизичные пульсации на входной и выходной границе за счет использования пространственной фильтрации.

В настоящей работе представлены результаты апробации метода применительно к задаче о шумоизлучении обдуваемой воздухом каверны. Выполнена верификация решения на основе сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными и решением интегральным методом FW-H [5]. Представлены преимущества разработанного метода перед другими методами вычислительной аэроакустики.

#### Литература:

1. Kefan Tang M.S. Numerical Simulation of the Flow-Induced Noise by Means of the Hybrid Method by LES and Aeroacoustic Analogy. Dissertation. Siegen University, 2004.
2. Карабасов С.А. Использование гибридного метода для моделирования шума от высокоскоростных лопастей вертолета // Мат. моделир. 2006. Т. 18. № 2. С. 3–23.
3. Суворов А.С., Коротин П.И., Соков Е.М. Метод конечно-элементного моделирования шумоизлучения, генерируемого неоднородностями тел, движущихся в турбулентном потоке жидкости // Акуст. журн., 2018. т.64. №6. С. 741-752.
4. Кайнова А.В., Коротин П.И., Соков Е.М., Суворов А.С. Валидация метода конечно-элементного моделирования переизлучения тел, обтекаемых турбулентным потоком жидкости // Прикладная математика и механика, 2012. №3. С. 384-392.
5. Hiroshi Yokoyama, Hiroshi Odawara, Akiyoshi Iida, "Effects of Freestream Turbulence on Cavity Tone and Sound Source", International Journal of Aerospace Engineering, vol. 2016, Article ID 7347106, 16 pages, 2016.

#### **Application of finite element modeling to the problem of determining hydrodynamic noise generated by local inhomogeneity**

Eremeev V.O., Suvorov A.S., Shaposhnikov V.A., Balakireva N.V.

IAP RAS, Nizhny Novgorod, Russia

In the problems of determining hydrodynamic noise, the space-time scales of sound and hydrodynamic waves differ significantly. Therefore, this problem is usually divided into the problem of determining acoustic noise sources (hydrodynamic) and the problem of determining the re-emission of these sources by the surface of a streamlined elastic body (acoustic). The most

common integral methods for solving the acoustic problem are Kirchhoff and FW-H [1,2]. However, they have a number of disadvantages, among which the most critical are the restriction on the geometry (Green's function) and the inability to take into account the resonant amplification of hydrodynamic noise (the elasticity of the body).

The method of finite element modeling of hydrodynamic noise developed at the IAP RAS [3,4] allows us to remove these restrictions. It is based on the joint solution of the Helmholtz equation and the equations of elasticity theory. In this method, acoustic radiation is defined as the result of scattering of turbulent pseudo-sound on the surface of the body. The method uses the Lighthill stress tensor as hydrodynamic sources. This makes it possible to suppress non-physical ripples at the input and output boundaries by using spatial filtering.

This paper presents the results of testing the method in relation to the problem of noise emission of an air-blown cavity. The solution was verified by comparing the calculation results with experimental data and the solution by the integral FW-H method [5]. The advantages of the developed method over other methods of computational aeroacoustics are presented.

References:

1. Kefan Tang M.S. Numerical Simulation of the Flow-Induced Noise by Means of the Hybrid Method by LES and Aeroacoustic Analogy. Dissertation. Siegen University, 2004.
2. Karabasov S.A. Application of a hybrid approach for far-field sound prediction from high-speed helicopter blades (Ispol'zovanie gibridnogo metoda dlya modelirovaniya shuma ot vysokoskorostnykh lopastei vertoleta) // Mathem. Mod., 2006, vol. 18, no. 2, pp. 3–23.
3. Suvorov A.S., Korotin P.I., Sokov E.M. Finite element method for simulating noise emission generated by inhomogeneities of bodies moving in a turbulent fluid flow // Acoustical Physics. 2018. vol. 64. no. 6. pp. 778-788.
4. Kainova A.V., Korotin P.I., Sokov E.M., Suvorov A.S. Validation method for finite-element modeling of acoustic re-emission of bodies in the turbulent fluid flow // Fluid Dynamics. 2019. vol. 54. no 7. pp 912-918.
5. Hiroshi Yokoyama, Hiroshi Odawara, Akiyoshi Iida, "Effects of Freestream Turbulence on Cavity Tone and Sound Source", International Journal of Aerospace Engineering, vol. 2016, Article ID 7347106, 16 pages, 2016

### **Численное моделирование кольцевого двигателя с вращающейся детонационной волной**

<sup>1</sup>Михальченко Е.В., <sup>1</sup>Рыбакин Б.П., <sup>2</sup>Никитин В.Ф., <sup>1</sup>Стамов Л.И., <sup>3</sup>Горячев В.Д.

<sup>1</sup>ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, <sup>2</sup>МГУ, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>ТвГТУ, г. Тверь, Россия

Детонационное горение имеет более высокий термодинамический КПД, чем традиционное дефлаграционное горение. Возможность улучшения термодинамического цикла за счет применения детонационного горения вместо дефлаграции была впервые предложена Я.Б. Зельдовичем [1]. Есть несколько двигателей на основе детонации, среди которых импульсный детонационный двигатель, который был наиболее широко исследован, первый импульсный детонационный двигатель предложил и построил Д.А. Николсом [2], в котором для создания тяги использовалась детонация водородно-воздушной смеси. Второй тип детонационного двигателя - двигатель с вращающейся детонационной волной, который привлекает все больше и больше внимания в двигательном сообществе [3-4]. Это связано с его высокой эффективностью сгорания топлива, отсутствием необходимости в регулярном зажигании, и его компактных размеров. Большинство исследований камеры с вращающейся детонационной волной сосредоточено на его ракетном режиме. Детонационная камера представляет из себя кольцевой зазор между коаксиальными цилиндрами; после иницирования детонационная волна вращается по окружности вблизи торца, с которого аксиально в камеру сгорания от топливных коллекторов подается свежая смесь. После израсходования топлива на детонацию продукты сгорания расширяются и покидают камеру сгорания, вызывая тягу.

В данной работе выполнено трехмерное численное моделирование камеры сгорания двигателя с вращающейся детонационной волной цилиндрического типа с внутренним телом, питаемым углеводородным топливом, ацетиленом. Математическая модель основана

на модели многокомпонентной газовой динамики с химическими превращениями и моделью турбулентности типа RANS. При моделировании использовался авторский компьютерный код, основанный на этой математической модели. Код был протестирован путем сравнения с экспериментами и аналитическими решениями для простых случаев. Для описания кинетики горения ацетилена использовалась упрощенная схема взаимодействия 10 компонентов, без «тяжелых» радикальных разновидностей: [C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, OH, O, H, N<sub>2</sub>]. Для детальной визуализации полученных результатов использовалась авторская система визуализации, предназначенная для графической обработки вычислений больших данных.

Литература:

1. Zeldovich Y. B. On the use of detonative combustion in power engineering Journal of Technical Physics (1940) Vol.10 — P. 1453–1461
2. J.A. Nicholls, E.K.Dabora, R.L.Gealer Studies in connection with stabilized gaseous detonation waves Symposium (International) on Combustion Volume 7, Issue 1, 1958, Pages 766-772
3. Wolański P.: Detonative propulsion, Proceedings of the Combustion Institute 34, 125–158 (2013)
4. V. Anand, E. Gutmark Rotating detonation combustors and their similarities to rocket instabilities Progress in Energy and Combustion Science Volume 73 (2019), pp. 182-234.

### **Simulation of an annular rotating detonation engine**

<sup>1</sup>Mikhhalchenko E.V., <sup>1</sup>Rybakin B.P., <sup>2</sup>Nikitin V.F., <sup>1</sup>Stamov L.L., <sup>3</sup>Goryachev V.D.

<sup>1</sup>SRISA RAS, <sup>2</sup>MSU, Moscow, Russia

<sup>3</sup>TvSTU, Tver, Russia

Detonation combustion has a higher thermodynamic efficiency than the traditional deflagration burning. The possibility of improving the thermodynamic cycle using detonation instead of deflagration was first proposed by Y. B. Zeldovich [1]. There are several engines based on detonation, among them the pulse detonation engine, which was the most widely studied, the first pulse detonation engine was proposed and built by D. A. Nichols [2], in which the detonation of a hydrogen-air mixture was used to create thrust. The second type of detonation engine is a rotating detonation wave engine, which is attracting more and more attention in the motor community [3-4]. This is due to its high fuel combustion efficiency, the absence of the need for periodic ignition, and its compact size. Most studies of the rotating detonation wave chamber are focused on its rocket mode. The detonation chamber is an annular gap between the coaxial cylinders; after initiation, the detonation wave rotates in a circle along the gap near the end at which the fresh mixture is introduced axially into the combustion chamber from the fuel collectors. After the fuel is used up for detonation, the combustion products expand and leave the combustion chamber, producing thrust.

In this paper, a three-dimensional numerical simulation of the combustion chamber of an engine with a rotating detonation wave of a cylindrical type with an internal body fed by a hydrocarbon fuel, acetylene, is performed. The mathematical model is based on the model of multicomponent gas dynamics with chemical transformations, considering a RANS turbulent modeling. The author's computer code based on the mathematical model was used in the simulation. The code was tested by comparing it with experiments and analytical solutions for simple cases. To describe the kinetics of combustion acetylene, a simplified chemical scheme of interaction of 10 components was used, without "heavy" radical species: [C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, OH, O, H, N<sub>2</sub>]. For detailed visualization of the obtained results, the author's visualization system was used, designed for graphical processing of big data calculations.

References:

1. Zeldovich Y. B. On the use of detonative combustion in power engineering Journal of Technical Physics (1940) Vol.10 — P. 1453–1461
2. J.A. Nicholls, E.K.Dabora, R.L.Gealer Studies in connection with stabilized gaseous detonation waves Symposium (International) on Combustion Volume 7, Issue 1, 1958, Pages 766-772
3. Wolański P.: Detonative propulsion, Proceedings of the Combustion Institute 34, 125–158 (2013)

4. V. Anand, E. Gutmark Rotating detonation combustors and their similarities to rocket instabilities Progress in Energy and Combustion Science Volume 73 (2019), pp. 182-234

### **Методика численного моделирования обледенения элементов летательного аппарата**

Нгуен Нгок Шанг, Михайлов С.В.

МФТИ, г. Долгопрудный, Россия

В работе представлено описание реализованной авторами методики численного моделирования обледенения элементов летательного аппарата. Для выполнения этой задачи требует моделировать течение воздуха, движение переохлаждённых капель и термодинамический процесс нарастания льда.

Для каждого из трех вышеперечисленных этапов существуют свои особенности и разные подходы к их решению. При моделировании поля воздуха необходимо учитывать влияние шероховатости ледяной поверхности на увеличение коэффициента конвективной теплопередачи, который сильно влияет на скорость образования льда и на форму ледяного слоя. Для изучения движения капель, можно использовать подход Лагранжа или подход Эйлера, при котором нужно решать параболическую систему водности. А для описания термодинамического процесса образования льда наиболее популярными являются две модели: модель Мессингера и мелководная модель SWIM (Shallow Water Icing Model). Разнообразие подходов к решению каждого этапа затрудняет выбор подходящих методов.

Изучая эти особенности, авторы выбрали модификацию модели турбулентности Спаларта-Аллмараса с учётом шероховатости для первого этапа, систему водности для второго этапа и мелководную модель SWIM для третьего этапа. Такой выбор позволяет использовать один метод конечного объёма для реализации трёх моделей и облегчить процесс разработки вычислительной программы. Единичный последовательный расчет нарастания льда по трем моделям будем называть циклом. Процесс расчета нарастания льда является итерационным. После каждого цикла, топология расчетной области может существенно изменяться при нарастании льда и требуется перестроение расчетной сетки до повторения цикла вычислений. Поэтому метод конечного объема реализован на неструктурированной расчетной сетке.

В работе представлены результаты численного моделирования нарастания льда на профиле NASA0012 и на поверхности датчика обледенения. Полученные результаты показывают работоспособность разработанной методики и вычислительной программы, и также открывают большие возможности к глубокому исследованию обледенения воздушного судна при полёте.

Литература:

1. Beaugendre H., Morency F., Habashi W. G. FENSAP-ICE's Three-Dimensional In-Flight Ice Accretion Module: ICE3D // Journal of Aircraft, vol. 40, 2003, p. 239-247.

2. Aupoix B., Spalart P.R. Extensions of the Spalart-Allmaras turbulence model to account for wall roughness // International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 24, 2003, p. 454-462.

3. Wright W. B., Rutkowski A. Validation Results for LEWICE 2.0, NASA, Tech. rep. CR 1999-208690.

### **The CFD methodology of the ice accretion simulation on aircraft components**

Nguyen Ngoc Sang, Mikhailov S.V.

MIPT, Dolgoprudny, Russia

The report describes the CFD in-flight icing simulation methodology for aircraft components implemented by authors. To perform this task, it is necessary to accurately compute the aerodynamic flow field, the supercooled droplet trajectories, and the thermodynamic ice accretion process.

Each of the three stages listed above has its own difficulties and different approaches to solving them. In the airflow simulation it must take into account the effects of the ice surface roughness on the increase of the skin friction, the convective heat transfer coefficient, which strongly influence the growth rate, shape and type of ice accretion. For droplet impingement calculations two main approaches can be used: Lagrangian particle tracking techniques and Eulerian model, which is based on the parabolic system of liquid water content. And to describe the thermodynamic ice

accretion process, there are two models: the Messinger Model and the Shallow Water Icing Model. The variety of approaches to solutions makes it difficult to choose a suitable methodology.

After studying these features, authors chose a modification of the Spalart-Allmaras turbulence model with rough wall extension for the first stage, the liquid water content system for the second stage, and the SWIM for the third stage. This choice allows us to use the finite volume method to solve three models and make the process of developing computational program easier. The process of ice accretion calculation is iterative. After each iteration, the geometry due to ice growth can change significantly, and the computational grid must be rebuilt before new cycle. Therefore, the finite volume method is implemented on unstructured meshes.

The results of Ice Accretion Simulation on the NACA0012 profile and on the ice detector are presented. The obtained numerical results already show the efficiency of the developed methodology, computational program, and offer major opportunities for in-depth study of in-flight icing.

### **Расчёт течений в межлопаточных каналах решёток турбинных профилей с использованием метода гибридных сеток**

Нигматуллин В.О., Максимов Ф.А.

ИАП РАН, г. Москва, Россия

Продемонстрирована возможность моделирования при помощи метода гибридных сеток всех видов безотрывных течений в межлопаточных каналах турбин. В докладе представлены результаты расчёта дозвукового, трансзвукового и сверхзвукового обтекания бесконечных решёток турбинных профилей в двумерной невязкой постановке. Проведено сравнение полученного расчётного распределения приведенной скорости  $\lambda$  по обводам профиля с экспериментальным [1][2].

В [3] предложен метод расчёта задач внешнего обтекания системы тел на гибридных сетках, представляющих собой одну внешнюю расчётную область с прямоугольной сеткой и системы наложенных на неё сеток, построенных около поверхности обтекаемых форм. Граничные условия на внешней границе для сеток около обтекаемых тел определяются в результате решения на внешней сетке. Параметры в узлах внешней прямоугольной сетки, которые попадают во внутреннюю область сеток около тел, после каждого шага интегрирования по времени также пересчитываются из решения на сетках около тел. Описанный метод решения задач сверхзвуковой внешней газодинамики был адаптирован для решения до- и транс- и сверхзвуковых задач внутренней газодинамики в периодической постановке. В частности, метод был применен к решению задач газодинамики турбомашин, таких как обтекание бесконечной решётки турбинных профилей. Для данной задачи актуальна двумерная постановка и безотрывное установившееся течение газа.

В качестве примера приведены результаты расчёта бесконечной решётки следующих двух профилей:

Профиль рабочей лопатки T106A  $\beta_1 = 37.7^\circ$   $\lambda_{2из} = 0.625$ .

Профиль сопловой лопатки P226  $\beta_1 = 0.0^\circ$   $\lambda_{2из} = 1.00, 1.20$ .

Расчитанное по модели Эйлера течение идеального невязкого газа, хорошо совпадает с наблюдавшейся в эксперименте картины течения реального воздуха.

По результатам анализа результатов численного моделирования можем заключить, что примененный метод расчёта на гибридной системе сеток позволяет моделировать до- транс и сверхзвуковые режимы течения в межлопаточных каналах решёток профилей турбомашин.

Литература:

1. Influence of Free-Stream Turbulence and Blade Pressure Gradient on Boundary Layer and Loss Behavior of Turbine Cascades (86•GT•234)

H. Hoheisel, R. Kiock, H. J. Lichtfuss, and L. Follner.

2. АТЛАС экспериментальных характеристик плоских решёток охлаждаемых газовых турбин/ В.Д. Венедиктов, А.В. Грановский, А.М. Карелин, А.Н. Колесов, М.Х. Мухтаров. – Москва: ЦИАМ, 1990. – 393 с.

3. Максимов Ф.А., Шевелев Ю.Д. Моделирование обтекания проницаемых поверхностей // Мат. моделирование. 2018. №11. С.127-144.

## Calculation of flows in vane channels of turbine profile cascades using the hybrid mesh method

Nigmatullin V.O., Maksimov F.A.  
ICAD RAS, Moscow, Russia

The possibility of modeling using the method of hybrid meshes all types of continuous flows in turbine blade channels has been demonstrated. The report presents the results of a two-dimensional calculation of subsonic, transonic and supersonic non-viscous flow around infinite cascades of turbine airfoils. Comparison of the obtained calculated distribution of the reduced velocity  $\lambda$  along the contours of the profile with the experimental one [1] [2] is carried out.

In [3], a method is proposed for calculating the problems of external flow around a system of bodies on hybrid meshes, which are one external computational domain with a rectangular mesh and a system of meshes superimposed on it, built around the surface of streamlined shapes. The boundary conditions at the outer boundary for meshes near streamlined bodies are determined as a result of the solution on the outer mesh. The parameters at the nodes of the outer rectangular mesh, which are inside the mesh area near the bodies, after each time integration step are also recalculated from the solution on the meshes near the bodies. The described method for solving problems of supersonic external gas dynamics was adapted to solve sub- and trans- and supersonic problems of internal gas dynamics in a periodic setting. In particular, the method was applied to solving problems of gas dynamics of turbomachines, such as the flow around an infinite cascade of turbine airfoils. For this problem, a two-dimensional formulation and a continuous steady-state gas flow are relevant.

As an example, the results of calculating an infinite cascade of the following two profiles are represented:

T106A rotor blade profile  $\beta_1 = 37.7^\circ$   $\lambda_{2is} = 0.625$ .

The profile of the nozzle blade R226  $\beta_1 = 0.0^\circ$   $\lambda_{2is} = 1.00, 1.20$ .

The flow of an ideal non-viscous gas calculated by the Euler model agrees well with the experimentally observed picture of the flow of real air.

By analyzing the results of numerical simulation, we can conclude that the applied method of calculation on a hybrid meshes system makes it possible to simulate sub- trans- and supersonic flow regimes in the inter-blade channels of the turbomachine airfoil cascades.

### Моделирование F слоя ионосферы Земли

<sup>1</sup>Останин П.А., <sup>2</sup>Кулямин Д.В., <sup>2</sup>Дымников В.П.

<sup>1</sup>МФТИ, г. Долгопрудный, Россия

<sup>2</sup>ИВМ РАН, г. Москва, Россия

Работа посвящена разработке динамической модели F слоя ионосферы Земли в рамках направления деятельности ИВМ РАН по созданию моделей Земной системы, в которых включены ионосфера и термосфера. Актуальность задачи обусловлена интересом к исследованию космической погоды, играющей важную роль для спутниковых систем, систем радиосвязи, а также для космической отрасли в целом. Состояние ионосферы и термосферы важно для условий распространения радиосигналов для навигационных систем и систем радиосвязи, а также характеристик движения космических аппаратов.

В разрабатываемой модели решается уравнение неразрывности для концентрации электронов. Используется ряд приближений: одноионная постановка задачи (в силу преобладания ионизации и рекомбинации атомарного кислорода и его иона), локальная квазинейтральность ионосферной плазмы, преобладание в её динамике амбиполярной диффузии вдоль геомагнитных силовых линий, а также преобладание поперечного электромагнитного дрейфа. В одной из имеющихся версий модели не предполагается совпадения географических и магнитных полюсов – имеется возможность задания положения магнитного полюса в географической системе. При этом для магнитного поля Земли используется дипольное приближение.

В основу численного моделирования положен метод расщепления. Уравнение записывается в сферической системе (используется приближение тонкого сферического слоя), после чего первый шаг расщепления отвечает плазмохимии-диффузии, а второй шаг соответствует трёхмерному переносу. Геометрические особенности (диффузия вдоль

магнитных линий) приводят к необходимости использования схем, на разностном уровне отражающих эти геометрические свойства. Для используемой схемы наличие этих свойств показано с помощью интегрального тождества, которым обладает дифференциальное уравнение диффузии. В частности, оно обеспечивает устойчивость схемы. Для уравнения переноса использована схема КАБАРЕ. Детальное рассмотрение численных методологий приведено в работах [2, 3].

В рамках использования предложенной модели проведена серия расчётов по моделированию экваториальной аномалии и главного ионосферного провала. При этом для экваториальной аномалии расчёты проводились по совместной модели термосферы-ионосферы с получением данных об эволюции температур и скоростей нейтрального ветра, а также с аналитическими добавками к скоростям на экваторе, а для главного ионосферного провала использована эмпирическая модель для параметризации электрического поля в авроральной зоне.

Литература:

1. Schunk R. W., Nagy A. F. *Ionospheres Physics, Plasma Physics, and Chemistry* // New York: Cambridge University Press, 2008. 628 с.
2. Д. В. Кулямин, П. А. Останин, В. П. Дымников, Моделирование F слоя земной ионосферы. Решение уравнений амбиполярной диффузии // Матем. моделирование, 31:4 (2019), 57–74
3. С. В. Кострыкин, Д. В. Кулямин, П. А. Останин, В. П. Дымников, Модель F слоя земной ионосферы на основе уравнений переноса и амбиполярной диффузии // Матем. моделирование, (2021), (в печати)
4. D. V. Kulyamin, P. A. Ostanin, Modelling of Equatorial Ionospheric Anomaly in INM RAS coupled thermosphere-ionosphere model // Rus. J. of Num. Analys. and Math. Model., 35(1):1-9, (2020)

### **Modelling of the Earth ionosphere F layer**

<sup>1</sup>Ostanin P.A., <sup>2</sup>Kulyamin D.V., <sup>2</sup>Dymnikov V.P.

<sup>1</sup>MIPT, Dolgoprudny, Russia

<sup>2</sup>INM RAS, Moscow, Russia

This work is devoted to the development of a dynamical model of the Earth ionosphere F layer within the framework of constructing the Earth system models, which include ionosphere and thermosphere. The applicability of the problem is determined by the interest in the study of space weather, which plays essential role for satellite systems, radio communication and the space industry as a whole. The state of the ionosphere and thermosphere is important for the conditions of radio signals propagation, navigation systems and radio communication, as well as the conditions of the space vehicles movement.

In the developed model, the continuity equation is solved for the electron concentration. A number of approximations is taken into account: single-ion formulation of the problem (according to the dominance of ionization and recombination of the oxygen atom and its ion respectively), local quasineutrality of the ionosphere plasma, predominance of the ambipolar diffusion along geomagnetic field lines as the main dynamical process and prevalence of the transverse electromagnetic drift. In one of the available versions of the model the coincidence of geographic and magnetic poles is not assumed - it is possible to set the coordinates of the magnetic pole in the geographical spherical coordinate system. Still, for the geomagnetic field the dipole approximation is used.

Numerical modelling is based on the splitting method. The equation is written in spherical coordinate system (in the approximation of a thin spherical layer), after that the first splitting step corresponds to the plasma chemistry and diffusion processes, and the second step corresponds to the three-dimensional advection. Geometric aspects (diffusion along the magnetic field lines) lead to the necessity to use schemes that reproduce these geometric properties at the finite-difference level. For the used scheme these properties are derived as a corollary from the integral identity, which is a property of the differential diffusion equation. In particular, this identity provides the stability of the scheme. For the numerical solving of the transport equation the CABARET scheme is used. A detailed discussion of the used numerical methodologies is given in [2, 3].

Within using the proposed model, a series of calculations was carried out to model the equatorial anomaly and the main ionospheric through. For the equatorial anomaly calculations were carried out by a coupled thermosphere-ionosphere model with obtaining data on the evolution of temperatures and velocities of the neutral wind and with analytical additions to the velocities at the equator, and for the main ionospheric through an empirical model for the electric field parametrization in the auroral zone was used.

### **Математическое моделирование распространения когерентного излучения в микроотверстиях печатных плат**

Пагава Л.Л., Могильная Т.Ю., Гребенюк Е.И., Александров А.С., Петелин Н.А.  
МАИ, г. Москва, Россия

Дифракционный метод находит свое применение при контроле качества микроотверстий в производственных условиях. Микроотверстия печатных плат, выполненных из фольгированного стеклотекстолита, отличаются не только аспектным отношением свыше единицы, но и сложной структурой образующей за счет нитей текстолита. Распушение этих нитей при сверлении - опасные дефекты, которые в дальнейшем приводят к снижению адгезионных свойств внутренней поверхности микроотверстий при металлизации.

Цель настоящей работы – с помощью математического моделирования распространения когерентного излучения в микроотверстиях печатных плат выявить структуру дифракционной картины (ДК) типичных дефектов для их дальнейшего выявления в процессе дифракционного контроля с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС).

Моделирование заключалось в расчете напряженности поля поглощенной волны и волны, рассеянной на дефекте, которая дает вклад в основное излучение, поступающее на приемник и, как следствие, искажает ДК. Поскольку лазерный источник удален от исследуемого объекта, то предполагалось, что на отверстие падал параллельный пучок когерентного излучения. При этом структура внутренней поверхности микроотверстия моделировалась как имитатор поверхности с отверстиями, обладающими разной формой, при этом дефекты учитывались изменением угла падения на поверхность. Модель вычисляет коэффициенты пропускания отражения, отражения преломления и дифракции первого порядка.

Результаты моделирования показывают, что рассматриваемый метод позволяет определять по дифракционной картине тип дефекта микроотверстий с аспектным отношением более единицы в стеклотекстолитовых печатных платах.

Литература:

1. Красников Г.Е., Нагорнов О.В., Старостин Н.В. Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics.

2. Research of the mechanism of parasitic modes excitation in the laser “the sours-the fiber” 16th International Laser Physics Workshop august 20-24 2007 Leon, Mexico p 283-284. Book abstract. T. Yu Mogilnaya, A. G Botikov

3. К. А. Валиев, Х. Зайфарт, Д. Р. Илькаев, Т. М. Махвиладзе, “Моделирование и оптимизация оптических схем установок фотолитографии”, Матем. моделирование, 2:1 (1990), 56–75.

### **Mathematical modeling of coherent radiation propagation in micro-holes of printed circuit boards**

Pagava L.L., Mogilnaya T.Yu., Grebenyuk E.I., Alexandrov N.A., Petelin N.A.  
MAI, Moscow, Russia

The diffraction method finds its application in the quality control of micro-holes in production conditions. Micro-holes of printed circuit boards made of foiled fiberglass differ not only in the aspect ratio of more than one, but also in the complex structure of the forming due to the threads of the textolite. The fluff of these threads during drilling is dangerous defects that further lead to a decrease in the adhesive properties of the inner surface of the micro-holes during metallization.

In this paper, using mathematical modeling of the propagation of coherent radiation in the micro-holes of printed circuit boards, the structure of the diffraction pattern (DC) of typical defects was revealed for their further detection in the process of diffraction control using artificial neural networks (INS).

The simulation consisted in calculating the field strength of the absorbed wave and the wave scattered on the defect, which contributes to the main radiation coming to the receiver and, as a result, distorts the DC. Since the laser source is removed from the object under study, it was assumed that a parallel beam of coherent radiation fell on the hole. At the same time, the structure of the inner surface of the micro-hole was modeled as a simulator of a surface with holes having different shapes, while defects were taken into account by changing the angle of incidence on the surface. The model calculates the transmission coefficients of reflection, refraction reflection and diffraction of the first order.

The simulation results show that the method under consideration makes it possible to determine the type of micro-hole defect with an aspect ratio of more than one in fiberglass printed circuit boards from the diffraction pattern.

### **Применение одномерных численных расчетных методов для моделирования радиальных перемещений деталей ротора ГТД с малыми затратами вычислительных ресурсов**

Самойленко Н.А., Кашин Н.Н.

АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь, Россия

Одним из путей развития существующих САУРЗ является создание предиктивных систем с динамическим управлением, основанных на математических моделях.

Для математических моделей, интегрированных в САУ, помимо требуемого уровня точности, главным является скорость вычислений. Так, например, для создания динамической САУРЗ необходима модель, которая с высокой скоростью и использованием минимальных вычислительных ресурсов рассчитывает текущее тепловое состояние и перемещения деталей, а также производит прогноз «вперед» на некоторый временной отрезок.

В данной работе рассмотрена возможность применения одномерных численных методик для определения нестационарного теплового и напряженно-деформированного состояния дисков и лопаток турбин натуральных двигателей по режимам ТПЦ с учетом переменных параметров охлаждения, параметрами теплоотдачи, зависящими от режима работы и зависящими от температуры теплофизическими свойствами.

Для дисков и лопаток ТНД одномерные методики, основанные на методе контрольных объемов (для теплового состояния диска), плоском осесимметричном расчете с постоянными по толщине напряжениями (для перемещений диска) и стержневых моделях (для замковой части и лопатки) обеспечивают высокую точность, так как в сечениях нет значительных осевых градиентов температур. Максимальная относительная погрешность температур диска (относительно средней по сечению температуры, полученной по верифицированной осесимметричной методике) по ТПЦ составила 0,9% ( $\Delta=3,5^\circ$ ), максимальная погрешность перемещений диска 4,5% ( $\Delta=0,018$  мм) перемещений лопатки -1,9% ( $\Delta=-0,012$  мм). В ТВД значительные осевые градиенты температур в сечениях деталей обуславливают большую погрешность. Максимальная погрешность определения температур диска 5,1% ( $\Delta=19,4^\circ$ ), перемещений диска 6,2% (0,12 мм), перемещений лопатки -7,1% (-0,09 мм). Максимальные погрешности достигаются на взлетном режиме и при выходе на стационарный режим значительно снижаются.

В ходе работы была проанализирована применимость одномерных моделей к интеграции в динамическую САУРЗ турбины. Погрешность моделей для наиболее сложных условий относительно верифицированных по экспериментальным данным расчетов находится в рамках 10%. Скорость вычисления нестационарных процессов (3000 секунд и более) находится в рамках 1 секунды при использовании менее 10мб вычислительной памяти. Приведенные выше критерии позволяют применять данные модели в быстродействующих динамических САУРЗ с достаточной точностью.

Литература:

1. Ruiz R., Albers B., Wojciech S., Seitzer K. Benefits of improved HP turbine clearance control. NASA/CP—2007-214995/VOL1, presented at the 2006 NASA seal/secondary air system workshop – Cleveland, OH – October, 2006.

2. Integrated turbine tip clearance and gas turbine engine simulation / J.W. Chapman, J.L. Kratz, T.H. Guo, J. Litt // NASA/TM—2016-219146, presented at the 52nd AIAA/ASME/SAE/ASEE conference, July. – Cleveland, OH. – 2016. DOI: 10.2514/6.2016-5047.

3. Active turbine tip clearance control trade space analysis of an advanced geared turbofan engine / J.L. Kratz // 2018 joint propulsion conference, 11 July. – 2018. DOI: 10.2514/6.2018-4822.

### **Application of one-dimensional numerical computational methods to modeling radial displacements of GTE rotor parts with low consumption of computational resources**

Samoylenko N.A., Kashin N.N.

JSC “UEC-Aviadvigatel”, Perm, Russia

One of the ways of development of existing ACC is the creation of predictive systems with dynamic control based on mathematical models, integrated into ACS.

For mathematical models integrated into ACS, in addition to the required level of accuracy, the main thing is the speed of calculations. So, for example, to create a dynamic ACC, a model is needed that, at high speed and using minimal computing resources, calculates the current thermal state and movement of parts, and also makes forecast "forward" for a certain time interval.

In this paper, we consider the possibility of using one-dimensional numerical techniques to determine the unsteady thermal and stress-strain state of disks and blades of turbines of real engines according to the modes of a TFM. The variable parameters of cooling, parameters of heat transfer, depending on the operating mode and thermophysical properties, depending on temperature, are taken into account.

For disks and blades of a LPT, one-dimensional techniques based on the control volume method (for the thermal state of the disk), plane axisymmetric calculation with stresses constant over the thickness (for disk displacements) and rod models (for the fir-tree root part and blade) provide high accuracy. The maximum relative error of the temperature disk (relative to the cross-section average temperature obtained by the verified axisymmetric method) according to the TFM was 0.9% ( $\Delta = 3.5^\circ$ ), the maximum error of the disk displacements was 4.5% ( $\Delta = 0.018$  mm) of the blade displacements -1.9% ( $\Delta = -0.012$  mm). In a HPT, significant axial temperature gradients in the sections of parts cause a large error. The maximum error in determining the temperature of the disk is 5.1% ( $\Delta = 19.4^\circ$ ), the displacement of the disk is 6.2% (0.12 mm), and the displacement of the blade is -7.1% (-0.09 mm). The maximum errors are achieved in takeoff mode and when entering the stationary mode, they are significantly reduced.

In the course of the work, the applicability of one-dimensional models to the integration of a turbine into a dynamic ACC was analyzed. The error of the models for the most difficult conditions relative to the calculations verified by the experimental data is within 10%. The speed of calculating non-stationary processes (3000 seconds or more) is within 1 second when using less than 10MB of computing memory. The above criteria make it possible to apply these models in high-speed dynamic ACC with sufficient accuracy.

#### References:

1. Ruiz R., Albers B., Wojciech S., Seitzer K. Benefits of improved HP turbine clearance control. NASA/CP—2007-214995/VOL1, presented at the 2006 NASA seal/secondary air system workshop – Cleveland, OH – October, 2006.

2. Integrated turbine tip clearance and gas turbine engine simulation / J.W. Chapman, J.L. Kratz, T.H. Guo, J. Litt // NASA/TM—2016-219146, presented at the 52nd AIAA/ASME/SAE/ASEE conference, July. – Cleveland, OH. – 2016. DOI: 10.2514/6.2016-5047.

3. Active turbine tip clearance control trade space analysis of an advanced geared turbofan engine / J.L. Kratz // 2018 joint propulsion conference, 11 July. – 2018. DOI: 10.2514/6.2018-4822.

### **О новом способе оценки локальной погрешности метода Эверхарта**

Фукин И.И., Кузнецов А.А., Завьялова Н.А., Негодяев С.С.

МФТИ, г. Долгопрудный, Россия

В работе был предложен и протестирован новый подход к оценке локальной ошибки интегрирования методом Эверхарта – одной из разновидностей неявных методов Рунге-Кутты.

В последние годы наблюдается увеличение числа искусственных спутников, во многом обусловленный ростом интереса к задачам дистанционного зондирования Земли, навигации и связи. Впоследствии это может привести к большому количеству объектов на околоземной орбите. Для точного прогнозирования движения и обновления каталогов необходимо определение баллистических траекторий с малой погрешностью.

Метод Эверхарта является часто используемым подходом в решении такого рода задач. Однако, не решенной до конца задачей остается вопрос об оценке локальной ошибки. Согласно общепринятому методу оценки, погрешность может быть вычислена по найденным коэффициентам разложения правой части системы обыкновенных дифференциальных уравнений, и норма этой ошибки может быть определена по последнему слагаемому этого разложения [1], [2]. Авторами был предложен иной способ оценки ошибки, суть которого в исключении последней точки коллокации (например, разбиения Гаусса-Радо) и новом пересчете коэффициентов разложения на основе вычисленных значений разделенных разностей. Далее, норма ошибки определяется как норма разности решений: исходного и полученного при удалении коллокационной точки, а шаг интегрирования на следующем слое по времени – по аналогу правила Рунге.

Анализ предложенной методики проводился при помощи реализованного на языке C++ метода Эверхарта. В ходе сравнения оценки погрешности по производным и по авторской методике, было показано, что последний способ лучше приближает значение ошибки к реальной. Это означает, что при помощи предложенного алгоритма возможна более корректная оценка шага, не приводящая к его чрезмерному уменьшению.

Литература:

1. Авдюшев В. А. и др. Численное моделирование орбит небесных тел. – 2015.
2. Бордовицына Т. В. и др. Теория движения искусственных спутников Земли: аналитические и численные методы: учебное пособие: [для студентов вузов по специальности 011501" Астрономия" и вариативной компонентой основной образовательной программы по направлению 030302" Физика и астрономия"]. – 2016.

### **On a new method for estimating the local error of the Evehart method**

Fukin I.I., Kuznetsov A.A., Zavalova N.A, Negodiayev S.S.

MIPT, Dolgoprudnyy, Russia

In this paper, a new approach to estimating the local integration error by the Everhart method, one of the varieties of implicit Runge – Kutta methods, was proposed, implemented and tested.

In recent years, there has been an increase in the number of satellites, largely due to interest in the fields of remote sensing and navigation, and in the provision of the Internet. Subsequently, this may lead to a large number of objects in low-Earth orbit. To accurately predict the movement and update catalogs, it is necessary to solve the problem of determining ballistic trajectories with a small error.

The Everhart method is a frequently used approach to solving such problems due to its recognition in the fields of ballistics. However, the question of its error assessment remains completely unexplored. According to the previously proposed and used method of estimating derivatives, the error can be calculated from the found coefficients of the expansion of the right part of the system of ordinary differential equations, and the norm of this error can be determined from the last term of this decomposition. However, in addition, another method of error estimation was proposed, the essence of which is to exclude the last collocation point (for example, in the Gauss-Rado quadrature) and a new recalculation of the above-mentioned expansion coefficients based on the calculated values of the divided differences. Further, the norm of the error is defined as the norm of the difference between the solutions: the original and the obtained one when the collocation point is removed, and the integration step on the next layer in time is defined due to the Runge rule.

The analysis of the proposed technique was conducted using the Everhart method. During the comparison of the error estimate by derivatives and by the one of the proposed by the author's method, it was shown that the second one approximates better the error value to the real one. This means that with the help of the author's methodology, a more correct estimation of the step is possible.

## **Сравнение различных способов раздачи соединительной муфты из сплава с памятью формы с учетом влияние на поведение материала вида напряженного состояния**

Шарунов А.В.

МАИ, г. Москва, Россия

Сплавы с памятью формы (СПФ) – конструкционные материалы, обладающие уникальными термомеханическими свойствами [1], одним из которых является свойство «разноспротивляемости». Это свойство заключается в значительном несовпадении кривых деформирования образцов из этих материалов при различных видах напряженного состояния [1].

Для активного применения СПФ в технике требуется наличие достоверных решений краевых задач механики этих сплавов. Однако, получение подобных решений, например, для толстостенного цилиндра, затруднено в виду объективной сложности определяющих соотношений СПФ, для которых зачастую невозможно получить аналитическое решение рассматриваемой краевой задачи вследствие качественной и количественной зависимости напряженно-деформированного состояния цилиндра от параметра вида напряженного состояния, значение которого зависит от радиальной координаты.

Для получения численного решения данной краевой задачи разработан программный модуль в рамках конечно – элементного комплекса Simulia Abaqus. Модуль содержит в себе соотношения, описывающие поведение СПФ [2], с учетом разноспротивляемости. Корректность работы модуля подтверждена путем его валидации по результатам аналитического решения ряда краевых задачи и верификации с использованием имеющихся экспериментальных данных для одноосного растяжения и сжатия образцов из этих сплавов.

С использованием данного программного модуля описан процесс раздачи соединительной муфты из СПФ в режиме мартенситной неупругости двумя методами: дорнированием, и под воздействием монотонно возрастающего и равномерно распределенного по поверхности давления. Также рассмотрена процедура, связанная с прямым термоупругим фазовым превращением под действием постоянного давления. Произведено сравнение этих способов раздачи муфты из СПФ.

Выводы:

Разработанный пользовательский программный модуль позволяет получить численное решение краевой задачи о раздаче соединительной муфты из СПФ.

В процессе численного решения задачи о раздаче муфт в виде толстостенных цилиндрических оболочек из СПФ установлено, что параметр вида девиатора напряжений зависит от радиальной координаты, а также нелинейно меняется при изменении давления. Особенно существенна эта зависимость при решении задачи в предположении и плоском напряженном состоянии.

Раздача муфты путем дорнирования является наиболее технологичным процессом, однако существует вероятность механического повреждения внутренней поверхности муфты. Напротив, метод раздачи монотонно возрастающим давлением, или с помощью прямого превращения под действием постоянного давления не повреждает внутреннюю поверхность муфты. Однако практическая реализация данных вариантов является технологически более сложной задачей.

Наибольшая величина раздачи при фиксированном максимальном давлении получается при использовании технологии прямого превращения.

Работа выполнена при финансовом содействии РФФИ проект № 20-01-00240.

Литература:

1. Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. 216 с.
2. Мовчан А.А., Казарина С.А., Сильченко А.Л. Экспериментальная идентификация модели нелинейного деформирования сплавов с памятью формы при фазовых и структурных превращениях // Деформация и разрушение материалов. – 2018. – № 12. – С. 2-11.
3. Мовчан А. А. Феноменологическая модель изменения фазово-структурных деформаций в сплавах с памятью формы // Известия РАН. Механика твердого тела. 2020. №4. С. 140-151.

## **Comparison of various methods of distributing a coupling made of shape memory alloy, taking into account the influence of the type of stress state on the behavior of the material**

Sharunov A.V.

MAI, Moscow, Russia

Shape memory alloys (SMA) – structural materials with unique thermomechanical properties [1], one of which is the property of material tension-compression asymmetry. This property consists in significant differences of the deformation curves of samples from these materials under different types of stress state [1].

For the active application of SMA in engineering, it is necessary to have reliable solutions to the boundary value problems of the mechanics of SMA. However, obtaining such solutions, for example, for a thick-walled cylinder, is difficult due to the objective complexity of the determining relations of the SMA, for which it is often impossible to obtain an analytical solution to the boundary value problem under consideration due to the qualitative and quantitative dependence of the cylinder's stress – strain state on the parameter of stress state type, the value of which depends on the radial coordinate.

To obtain a numerical solution of this boundary value problem, a software module in the Simulia Abaqus finite element complex has been developed. The module contains relations describing the behavior of the SMA [2], taking into account the tension-compression asymmetry. The correctness of the module operation was confirmed by its validation based on the results of several analytical boundary problem solutions and verification using available experimental data for uniaxial stretching and compression of SMA samples.

Using this software module, the process of distributing a coupling from SMA in the mode of martensitic inelasticity is described by two methods: by dornig, and under the influence of monotonically increasing and evenly distributed pressure over the surface. A procedure related to direct thermoelastic phase transformation under constant pressure is also considered. A comparison of these methods of distributing the SMA coupling.

Conclusions:

The developed custom software module allows us to obtain a numerical solution to the boundary value problem of distributing the SMA coupling.

In the process of numerical solution of the distributing problem couplings in the form of thick-walled cylindrical shells from SMA, it was found that the parameter of the type of stress deviator depends on the radial coordinate, and changes non-linearly with pressure changes. This dependence is especially significant when solving the problem in the assumption and in the plane stress state.

Distribution of the coupling by dornig is the most technological process, however, there is a possibility of mechanical damage to the inner surface of the coupling. On the contrary, the method of distribution by monotonically increasing pressure, or by direct transformation under the action of constant pressure, does not damage the inner surface of the coupling. However, the practical implementation of these options is a technologically more complex task.

The largest distribution value at a fixed maximum pressure is obtained by using the direct conversion technology.

The work was carried out with the financial assistance of the RFFI project No. 20-01-00240.

# Секция №1. «Математическое моделирование и цифровые двойники»

## Section No. 1. Mathematical Modelling and Digital Doubles

### Упрощенная верификационная модель РЛС

Балакин Д.А., Керский Е.В.

ОАО «НПК «НИИДАР», г. Москва, Россия

В докладе излагаются общие принципы построения упрощенной верификационной модели (УВМ) [1], а также уделено внимание основным аспектам ее архитектуры. В частности, архитектура УВМ реализована в утилите Simulink, входящий в стандартный пакет программы MATLAB [2]. За счет модельно-ориентированного проектирования УВМ на Simulink позволяет отразить общее понимание принципов работы изделия, а также выделить основные параметры управления реальной аппаратуры и программного обеспечения.

Основное внимание доклада сконцентрировано на реализации аппаратной части РЛС. Аппаратная часть состоит из аналогового и цифрового приемо-передающего тракта. Аналоговый приемо-передающий тракт выполняет следующие функции: фильтрацию, аттенюацию, предварительное усиление, также в нем учитываются нелинейные элементы, шумовые эффекты. Цифровой приемо-передающий тракт обеспечивает цифро-аналоговое преобразование, аналого-цифровое преобразование, аттенюацию, преобразование частот, фильтрацию сигнала, многоскоростную обработку, задержку сигнала. Антенно-фидерный тракт, среда распространения и цель реализован стандартами библиотеками MATLAB и блоками Simulink [3].

В предлагаемой УВМ, проработаны алгоритмы калибровки и фазировки приемо-передающего тракта как по внешнему источнику, так и по контрольному сигналу. Алгоритмы базируются на следующих принципах: корреляционной и спектральной обработке [4], а также на основе преобразования Гильберта и свойствах ЛЧМ сигнала.

Предлагаемая в докладе УВМ содействует грубой оценки характеристик РЛС, а также способствует формированию исходных данных для разработки дальнейших более сложных моделей, а также их верификации.

Литература:

1. Балакин Д. А., Керский Е. В. Разработка цифрового двойника радиолокационной станции дальнего обнаружения // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 1. С. 10–18. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-1-10-18>.

2. Bassem R. Mahafza, Atef Z. Elsherbeni. MATLAB simulations for radar systems design. Elsherbeni. 2004. 686 pp.

3. Агапов О.А., Балакин Д.А., Добродумов А.Б., Керский Е.В., Юрков М.В. Моделирование антенного радиоэлектронного комплекса средствами MATLAB и Simulink // Технологии разработки и отладки сложных технических систем: VI Всероссийская научно-практическая конференция: сборник материалов / Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — 242,

4. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. Москва, 2006. – 719 с.

### A simplified verification model for radar system

Balakin D.A., Kersky E.V.

NIIDAR, Moscow, Russia

The report describes the general principles of building a simplified verification model (SVM), and also focuses on the main aspects of its architecture. In particular, the SVM architecture is implemented in the Simulink utility, which is included in the standard MATLAB program package.

Due to model-based design, the SVM on Simulink allows us to reflect a general understanding of the principles of product operation, as well as highlight the main control parameters of real hardware and software.

The main focus of the report is focused on the implementation of the hardware part of the radar. The hardware part consists of an analog and digital transmit-receive path. The analog transceiver path performs the following functions: filtering, attenuation, preliminary amplification, it also takes into account nonlinear elements, noise effects. The digital receiving and transmitting path provides digital-to-analog conversion, analog-to-digital conversion, attenuation, frequency conversion, signal filtering, multi-rate processing, signal delay. Antenna feeder path, distribution medium and target are implemented by MATLAB standards and Simulink blocks.

The algorithms for the calibration and phasing of the receiving-transmitting path both by an external source and by a control signal have been worked out in the proposed SVM. The algorithms are based on the following principles: correlation and spectral processing, as well as on the basis of the Hilbert transform and the properties of the chirp signal.

The SVM proposed in the report contributes to a rough estimate of the characteristics of the radar, and also contributes to the formation of initial data for the development of further more complex models, as well as their verification.

### **Обоснование необходимости создания цифровых двойников при разработке крупногабаритных трансформируемых рефлекторов космических аппаратов**

Голдобин Н.Н.

СибГУ, г. Красноярск, Россия

Для реализации спутниковой связи получили широкое распространение многолучевые антенны с параболическими и контурными рефлекторами. Требования к рабочим частотам и точности формы отражающей поверхности космических рефлекторов постоянно растут, в свою очередь, также возрастает вклад негативного влияния наземных и космических факторов, возникающих в процессе всего жизненного цикла изделия.

С целью повышения эксплуатационных характеристик космических рефлекторов элементы их конструкций изготавливают из полимерных композиционных материалов, обладающих высокими удельными прочностными характеристиками и низким КЛТР. Недостатком таких материалов является большой разброс выходных параметров готовых конструкций, связанный с несовершенством технологии изготовления, обработка которой требует верификации геометрически и физически сложных КЭМ отдельных конструктивных элементов из композиционных материалов и всего изделия в целом.

Важная роль при создании космических рефлекторов отводится дорогостоящим и длительным наземным экспериментальным исследованиям, для проведения которых необходима сложная имитация условий орбитальной эксплуатации рефлектора. Это приводит к необходимости использования методов математического моделирования, которые служат инструментами прогнозирования состояния конструкции и радиотехнических характеристик рефлектора, находящегося в процессе орбитальной эксплуатации, с учетом влияния факторов, накопленных в результате наземной эксплуатации.

Учет всех технических требований, предъявляемых к конструкциям космических рефлекторов, и влияния внешних факторов, возникающих и действующих на протяжении всего жизненного цикла изделия, требует разработки комплексного системного подхода к проектированию. Это позволит реализовать необходимую и достаточную точность при разработке комплексной математической модели рефлектора в соответствии с выбранным уровнем детализации. Реализация сложного математического аппарата в совокупности со средствами построения системно-структурных моделей, а также с возможностью построения двухсторонней связи между моделями и реальным объектом стала возможна благодаря инновационной концепции построения цифровых двойников, состоящих в общем случае из цифрового двойника изделия, цифрового двойника производства и цифровых двойников оборудования. [1, 2]

Таким образом, реализация цифрового двойника космического крупногабаритного рефлектора, представляющего собой сложную техническую систему [3], подразумевает

проведение инженерных и научных работ с использованием методов конечно-элементного моделирования, многопараметрической оптимизации и моделей пониженного порядка с целью подготовки к интеграции цифрового двойника в единое цифровое пространство.

Использование концепции цифровых двойников для космических систем связи, навигации и ретрансляции в контексте создания методологии цифровизации проектирования, производства и эксплуатации высокочастотных многолучевых антенных систем и их конструктивных элементов из полимерных композиционных материалов позволят перейти на новый этап развития сложных технических систем, способных автономно проводить мониторинг их работоспособности и корректировку технических характеристик.

### **Justification of need to create digital twins in development of large deployable reflectors for a spacecraft**

Goldobin N.N.

Reshetnev University, Krasnoyarsk, Russia

For the implementation of satellite communications, multi-beam antennas with parabolic and contour reflectors are widely used. Requirements for operating frequencies and shape accuracy of the reflecting surface of space reflectors are constantly growing, in turn, the contribution of the negative influence of ground and space factors that arise during the entire life cycle of the product also increases.

In order to improve the operational characteristics of space reflectors, their structural elements are made of polymer composite materials with high specific strength characteristics and low thermal expansion coefficient. The disadvantage of such materials is a large scatter of the output parameters of finished structures associated with the imperfection of manufacturing technology, the development of which requires verification of geometrically and physically complex FEM of individual structural elements made of composite materials and the entire product as a whole.

An important role in the creation of space reflectors is assigned to expensive and lengthy ground-based experimental studies, for which a complex imitation of the conditions of the orbital operation of the reflector is required. This leads to the need to use mathematical modeling methods, which serve as tools for predicting the state of the structure and the radio technical characteristics of a reflector in the process of orbital operation, taking into account the influence of factors accumulated as a result of ground operation.

Taking into account all the technical requirements for the structures of space reflectors, and the influence of external factors that arise and act throughout the entire life cycle of the product, requires the development of an integrated systematic approach to design. This will allow realizing the necessary and sufficient accuracy when developing a complex mathematical model of the reflector in accordance with the selected level of detail. The implementation of a complex mathematical apparatus in conjunction with the means of building system-structural models, as well as with the possibility of building a two-way connection between models and a real object, became possible thanks to the innovative concept of building digital twins, consisting in the general case of a digital twin of a product, a digital twin of production and digital twins equipment. [1, 2]

Thus, the implementation of a digital twin of a large-sized space reflector, which is a complex technical system [3], implies the implementation of engineering and scientific work using finite element modeling methods, multi-parameter optimization and reduced-order models in order to prepare for the integration of the digital twin into a single digital space.

Using the concept of digital twins for space communication, navigation and relaying systems in the context of creating a digitalization methodology for the design, production and operation of high-frequency multibeam antenna systems and their structural elements made of polymer composite materials will make it possible to move to a new stage in the development of complex technical systems capable of autonomously monitoring their performance and adjustments to technical specifications.

## Аналоговые киберфизические сети взаимодействующих процессов в технических системах

Дембицкий Н.Л.

МАИ, г. Москва, Россия

Совершенствование микроконтроллеров [1, 2] создало условия для развития встроенных систем [3, 4] в направлении интеграции вычислений и физических процессов. В докладе рассматривается модель технической системы в виде сети физических процессоров (ФП), которые рассматриваются не как ускорители вычислений [5], а как компоненты логически связанных процессов преобразования энергии агрегатов. Перспективной областью применения таких сетей являются микроэлектромеханические системы [6, 7], объединяющие в себе микроэлектронные и микромеханические компоненты.

Предложен переход от гибридных киберфизических систем [8, 9] к аналоговой функционально-логической обработке состояний энергетических потоков, передаваемых между ФП. Работа аналоговой киберфизической сети (АКФС) определяется поведением компонентов в ответ на возникающие внешние и внутренние события [10]. Переход сети из одного состояния в другое обуславливается ограничениями на параметры входящих и исходящих разнородных энергетических потоков. Введение в ФП логических операторов позволяет строить нецифровые конечные автоматы с событийным аппаратным управлением алгоритмами решения задач.

Элементная база АКФС- континуальные процессоры [11], объединяющие обработку аналоговых сигналов и логический анализ данных.

Примеры создания на базе АКФС автоматических устройств, демонстрируют преимущества перехода от цифровых систем к аналоговым методам.

Литература:

1. Бродин В. Б., Калинин А. В. Системы на микроконтроллерах и БИС программируемой логики. — М.: ЭКОМ, 2002. — ISBN 5-7163-0089-8., 400 с.
2. John L. Hennessy, David A. Patterson. Computer architecture: a quantitative approach. San Francisco. Morgan Kaufmann publishers. <https://www.researchgate.net/>, 1357 p. · 2013 .
3. Edward A. Lee, Sanjit A. Seshia. Introduction to Embedded Systems, A Cyber-Physical Systems Approach. 2011. <http://LeeSeshia.org>.
4. Actor-Oriented Design of Embedded Hardware and Soft ware Systems// Journal of Circuits, Systems, and Computers. 2003. № 12.
5. Nicholas Blachford. Lets Get Physical: Inside The PhysX Physics Processor (англ.) (2006), [www.blachford.info/computer/articles/PhysX2.html](http://www.blachford.info/computer/articles/PhysX2.html).
6. Презентация на тему: «Микросистемная техника «Введение в МЭМС». Е.Н.Пятышев, М.С. Лурье, Ю.Д. Акульшин Санкт-Петербург СПбГПУ Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет, [myshared.ru](http://myshared.ru).
7. А. Борзенко Технология MEMS ([bytemag.ru](http://bytemag.ru)), Бестселлеры ИТ-рынка, №1, (89), январь 2006 г.
8. Ricardo G. Sanfelice Analysis and Design of Cyber-Physical Systems: A Hybrid Control Systems Approach. Department of Computer Engineering University of California Santa Cruz, CA 95064 с. 29.
9. T. A. Henzinger. The theory of hybrid automata. In M. Inan and R. Kurshan, editors, Verification of Digital and Hybrid Systems, volume 170 of NATO ASI Series F: Computer and Systems Sciences, pages 265–292. Springer-Verlag, 2000.
10. В.И. Волчихин, Н.П. Вашкевич, Р.А. Бикташев Модели событийных недетерминированных автоматов представления алгоритмов управления взаимодействующими процессами в многопроцессорных вычислительных системах на основе использования механизма монитора. «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки», № 2 (с. 5-14) [https://izvuz\\_tn.pnzgu.ru/](https://izvuz_tn.pnzgu.ru/).
11. Патент на изобретение РФ RU 2739723 C1.

## **Analog cyber-physical networks of interacting processes in technical systems**

Dembitsky N.L.

MAI, Moscow, Russia

Improvement of microcontrollers [1, 2] has created conditions for the development of embedded systems [3, 4] in the direction of integrating computations and physical processes. The report examines a model of a technical system in the form of a network of physical processors (PP), which are considered not as accelerators of computations [5], but as components of logically connected processes of energy conversion of aggregates. A promising area of application of such networks is microelectromechanical systems [6, 7], combining microelectronic and micromechanical components

The transition from hybrid cyberphysical systems [8, 9] to analog functional-logical processing of the states of energy flows transmitted between PPs is proposed. The operation of an analogue cyber-physical network (ACPN) is determined by the behavior of components in response to emerging external and internal events [10]. The transition of the network from one state to another is conditioned by restrictions on the parameters of incoming and outgoing heterogeneous energy flows. The introduction of logical operators into PP makes it possible to create non-digital finite state machines with hardware event control.

The element base of the ACPN is continuous processors that combine analog signal processing and logical data analysis.

Examples of creating automatic devices on the basis of ACPN demonstrate the advantages of switching from digital systems to analog methods.

References:

1. Brodin VB, Kalinin AV Systems on microcontrollers and LSIs of programmable logic. - M.: ECOM, 2002. — ISBN 5-7163-0089-8., 400 c.
2. John L. Hennessy, David A. Patterson. Computer architecture: a quantitative approach. San Francisco. Morgan Kaufmann publishers. <https://www.researchgate.net/>, 1357 p. · 2013,
3. Edward A. Lee, Sanjit A. Seshia. Introduction to Embedded Systems, A Cyber-Physical Systems Approach. 2011. <http://LeeSeshia.org>.
4. Actor-Oriented Design of Embedded Hardware and Software Systems// Journal of Circuits, Systems, and Computers. 2003. № 12.
5. Nicholas Blachford. Lets Get Physical: Inside The PhysX Physics Processor (англ.) (2006), [www.blachford.info/computer/articles/PhysX2.html](http://www.blachford.info/computer/articles/PhysX2.html).
6. Prezentatsiya na temu: " Mikrosistemnaya tekhnika « Vvedeniye v MEMS ». Ye.N.Pyatyshev, M.S. Lur'ye, YU.D.Akul'shin Sankt-Peterburg SPbGPU Sankt-Peterburgskiy Gosudarstvennyy Politekhnicheskii Universitet.", [myshared.ru](http://myshared.ru).
7. A. Borzenko MEMS technology (bytemag.ru), Bestsellers of the IT market, No. 1, (89), January 2006.
8. Ricardo G. Sanfelice Analysis and Design of Cyber-Physical Systems: A Hybrid Control Systems Approach. Department of Computer Engineering University of California Santa Cruz, CA 95064 c. 29.
9. T. A. Henzinger. The theory of hybrid automata. In M. Inan and R. Kurshan, editors, Verification of Digital and Hybrid Systems, volume 170 of NATO ASI Series F: Computer and Systems Sciences, pages 265–292. Springer-Verlag, 2000.
10. VI Volchikhin, NP Vashkevich, RA Biktashev Models of event-driven non-deterministic automata for representing control algorithms for interacting processes in multiprocessor computing systems based on the use of the monitor mechanism. "Proceedings of higher educational institutions. Volga region. Technical Sciences ", No. 2 (p. 5-14) [https://izvuz\\_tn.pnzgu.ru/](https://izvuz_tn.pnzgu.ru/).
11. Patent for invention of the Russian Federation RU 2739723 C1.

### **Применение машинного обучения для прогнозирования параметров качества деталей и узлов БПЛА в условиях аддитивного производства**

Загидуллин Р.С., Родионов Н.В.

Самарский университет, г. Самара, Россия

В настоящее время в производстве беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) находит широкое распространение аддитивные технологии, которые позволяют получать детали и

узлы практически любой геометрии. Наиболее распространенной разновидностью аддитивных технологий является FDM 3D-печать. FDM (Fused Deposition Modeling) 3D-печать – это технология получения трехмерных деталей путем послойного наплавления нити из полимерных материалов (филаментов) [1].

В производстве БПЛА FDM 3D-печать главным образом используют для изготовления планера. В качестве материалов обычно служат полимерные композиционные материалы. Но необходимо отметить, что во время 3D-печати возникают различного рода дефекты. Как показала практика, дефекты возникают из-за некорректных введенных значений параметров FDM оборудования и технологических режимов 3D-печати, таких как температура экструдера, температура рабочего стола, скорость 3D-печати, скорость надува вентилятора в область печати, диаметр сопла, толщина слоя и т.д. Кроме того, необходимо отметить, что комбинация указанных параметров для 3D-печати могут выдать абсолютно разного рода качества напечатанных деталей и узлов, что значительно затрудняет работу инженерно-технологов и операторов аддитивного оборудования.

Учитывая вышеуказанное, возникла необходимость создать модель прогнозирования (предиктивную модель) качества напечатанных деталей и узлов БПЛА в условиях аддитивного производства на основе машинного обучения (Machine learning). В качестве набора данных (Data set) для машинного обучения использованы экспериментальные данные, полученные нами в результате многократных опытов на робастность FDM 3D-печати планера БПЛА из полимерного композитного материала – Carbon Fiber (PLA + 25% Carbon) на FDM 3D-принтере с картезианской кинематикой. Для разработки модели использован язык Python 3.6 с использованием модуля Linear regression (линейная регрессия). Язык Python является высокоуровневым языком программирования с динамической строгой типизацией и широко используется в областях Data Science (Наука о данных) и Machine learning. Линейная регрессия – регрессионная модель зависимости одной (зависимой) переменной  $y$  от другой или нескольких других переменных (независимых переменных)  $x$  с линейной функцией зависимости.

Разработанная модель прошла апробацию по прогнозированию следующих параметров качества планера БПЛА: шероховатость и точность расстояния между отверстиями. Дальнейшие исследования направлены на проведение дополнительных экспериментов для выявления зависимости входных переменных и дополнительных прогнозируемых параметров качества (волнистость – волнообразное отклонение поверхности) с последующим их вводом в модель прогнозирования.

Литература:

1. R. S. Zagidullin, N. I. Zezin and N. V. Rodionov Improving the quality of FDM 3D printing of UAV and aircraft parts and assemblies by parametric software changes // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1027 (2021) 012031. DOI:10.1088/1757-899X/1027/1/012031.

### **Application of machine learning to predict the quality parameters of UAV parts and assemblies in additive manufacturing**

Zagidullin R.S., Rodionov N.V.  
Samara University, Samara, Russia

Currently, additive technologies are widely used in the production of unmanned aerial vehicles (UAVs), which make it possible to obtain parts and assemblies of almost any geometry. The most common type of additive technology is FDM 3D printing. FDM (Fused Deposition Modeling) 3D printing is a technology for producing three-dimensional parts by layer-by-layer fusing of a filament from polymer materials (filaments) [1].

In the production of UAVs, FDM 3D printing is mainly used to make airframes. The materials are usually polymer composites. But it should be noted that during 3D printing, various kinds of defects occur. As practice has shown, defects arise due to incorrect entered values of the FDM printer parameters and 3D printing technological modes, such as extruder temperature, desktop temperature, 3D printing speed, fan blowing speed into the printing area, nozzle diameter, layer thickness, and etc. In addition, it should be noted that the combination of these parameters for 3D printing can produce completely different kinds of quality of printed parts and assemblies, which significantly complicates the work of process engineers and operators of additive equipment.

Considering the above, it became necessary to create a model for predicting the quality of printed parts and units of UAVs in conditions of additive manufacturing based on machine learning. As a dataset for machine learning, we used the experimental data obtained by us as a result of multiple experiments on the robustness of the FDM 3D printing of the UAV airframe from a polymer composite material - Carbon Fiber (PLA + 25% Carbon) on an FDM 3D printer with Cartesian kinematics. To develop the model, the programming language Python 3.6 was used using the Linear regression module. The Python programming language Python is a dynamically strongly typed high-level programming language that is widely used in the fields of Data Science and Machine learning. Linear regression is a regression model of the dependence of one variable  $y$  on another or several other variables  $x$  with a linear dependence function.

The developed model has been tested to predict the following parameters of the quality of the UAV airframe: roughness and accuracy of the distance between the holes. Further studies are aimed at conducting additional experiments to identify the dependence of the input variables and additional predicted quality parameters (waviness – undulating surface deviation) with their subsequent input into the forecasting model.

References:

1. R. S. Zagidullin, N. I. Zezin and N. V. Rodionov Improving the quality of FDM 3D printing of UAV and aircraft parts and assemblies by parametric software changes // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1027 (2021) 012031. DOI:10.1088/1757-899X/1027/1/012031.

### **Использование сверточных нейронных сетей для распознавания рукописных символов**

Иванова Н.А., Кубанских О.В., Беднаж В.А.  
БГУ, г. Брянск, Россия

Проблема распознавания рукописных символов всегда будет оставаться одной из актуальных задач. Особенно это актуально при обучении письму детей дошкольного возраста и младшего школьного возраста, а также при коррекции почерка у разных возрастных групп.

Алгоритм сверточных нейронных сетей на стадии обучения на входной слой получает набор изображений, на которых автоматически определяются отличительные особенности, используемые в последующем для определения написанных символов.

Написанный пользователем символ подается на вход нейросети для распознавания. Каждому символу в нейросети соответствует уникальный индекс, например, цифрам соответствуют индексы от 0 до 9, заглавным буквам русского алфавита соответствуют индексы от 10 до 42. При необходимости распознать символ, рисунок с области рисования сохраняется в файл, который передается в программу. Файл преобразовывается в массив данных: 0 – пустой или белый пиксель, а 1 – пиксель, имеющий цвет.

После данной операции массив передается на вход нейронной сети, которая при прохождении данных по слоям рассчитывает средний вес и определяет индекс изображения. Сравнивая индекс распознанного символа с имеющимися в базе знаний, выдётся сообщение о правильности написанного символа.

При увеличении обучающей выборки значительно растет процент точности распознавания, при чем время выполнения повышается незначительно, что доказывает эффективность созданной нейронной сети. Точность классификатора на основе разработанной свёрточной нейронной сети составила 93% при обучающей выборке в 10000 элементов.

Разработанный алгоритм способен успешно распознавать символы и может, используя описанный выше процесс обучения постоянно совершенствоваться.

Литература:

1. Бессмертный, И. А. Системы искусственного интеллекта: учебное пособие для вузов / И. А. Бессмертный. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2021. — 157 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-07467-3.

2. Нейронные сети: полный курс : [перевод с английского] / Саймон Хайкин. - Изд. 2-е, испр. - Москва; Санкт-Петербург: Диалектика, 2019. - 1103 с.: ил., табл.; 24 см.; ISBN 978-5-907144-22-4.

3. Ле Мань Ха. Свёрточная нейронная сеть для решения задачи классификации. Труды МФТИ, том 8, №3 (31) (2016) с. 91–97.

4. Азаров И.С., Прокопена А.С. Сверточные нейронные сети для распознавания изображений. Шестая Международная научно-практическая конференция «BIG DATA and Advanced Analytics. BIG DATA и анализ высокого уровня», Минск, Республика Беларусь, с.270-280.

### **Using convolutional neural networks to recognize handwritten characters**

Ivanova N.A., Kubanskikh O.V., Bednazh V.A.

BSU, Bryansk, Russia

The problem of recognizing handwritten characters will always remain one of the most urgent tasks. This is especially true when teaching writing to children of preschool age and primary school age, as well as when correcting handwriting in different age groups.

The algorithm of convolutional neural networks at the training stage receives a set of images for the input layer, on which distinctive features are automatically determined, which are subsequently used to determine the written characters.

The character written by the user is fed to the input of the neural network for recognition. Each character in the neural network corresponds to a unique index, for example, numbers correspond to indexes from 0 to 9, capital letters of the Russian alphabet correspond to indexes from 10 to 42. If it is necessary to recognize the symbol, the drawing from the drawing area is saved to a file that is passed to the program. The file is converted to an array of data: 0 is an empty or white pixel, and 1 is a pixel that has a color.

After this operation, the array is passed to the input of the neural network, which, when passing data through the layers, calculates the average weight and determines the index of the image. Comparing the index of the recognized symbol with those available in the knowledge base, a message is issued about the correctness of the written symbol.

As the training sample increases, the percentage of recognition accuracy increases significantly, while the execution time increases slightly, which proves the effectiveness of the created neural network. The accuracy of the classifier based on the developed convolutional neural network was 93% with a training sample of 10,000 elements.

The developed algorithm is able to successfully recognize characters and can be constantly improved using the learning process described above.

### **Идентификация с помощью спекл-изображений, полученных на основе квантовых свойств когерентного излучения**

<sup>1</sup>Илющенко В.В., <sup>2</sup>Кукин Н.С., <sup>2</sup>Никитин А.К.

<sup>1</sup>МАИ, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>МОУ «ИИФ», г. Серпухов, Россия

Основной проблемой систем идентификации является возможность копирования ключа-идентификатора для получения несанкционированного доступа. Применение в качестве ключа носителя оптических физически неклонировуемых функций позволяет исключить возможность его копирования ценой усложнения как аппаратной, так и программно-математической части системы идентификации.

Оптические физически неклонировуемые функции являются спекл-изображениями и, в случае получения путем прохождения когерентного излучения через полупрозрачный объект, представляют собой наложение пространственных мод когерентного излучения с светотеневым отпечатком макро- и интерференционной картиной на микроструктурах полупрозрачного объекта. Таким образом, спекл-изображения являются следствием как классических, так и квантовых процессов взаимодействия когерентного излучения с полупрозрачным веществом, что позволяет гарантировать практическую невозможность создания его физических копий. Часто спекл-изображения рассматриваются в качестве шума

[1]. Шумоподобный характер позволяет рассматривать оптические физически неклонированные функции как хорошую основу для создания систем идентификации [2].

Алгоритм извлечения идентификационной информации из спекл-изображения ключа-идентификатора может быть построен без применения процедуры сравнения данного изображения с эталонами, заранее записанными в базу данных [3]. Это позволяет отказаться от хранения эталонных изображений, исключая таким образом возможность их несанкционированного копирования и использования для получения несанкционированного доступа.

Системы идентификации, построенные на обработке спекл-изображений ключа-идентификатора, позволяют исключить возможность подделки или копирования ключа, что многократно повышает защиту от несанкционированного доступа.

Литература:

1. Andreev A.L., Andreeva T.B., Kompanets I.N., Zalyapin N.V., Starikov, R.S. Speckle-noise suppression using electro-optical cell with helix-free ferroelectric LC // Journal of Physics: Conference Series, 2016. V.737(1).
2. Кукин Н.С. Построение систем идентификации на базе алгоритма оптимального извлечения информации из оптических физически неклонированных функций // Известия Института инженерной физики, 2019. № 3 (53). – С. 52-55.
3. Никитин А.К., Кукин Н.С. Извлечение уникальной информации из различных изображений объекта в одних и тех же условиях // Известия Института инженерной физики, 2016. №4(42). – С.32-35.

#### **Identification based on speckle images obtained using the quantum properties of coherent radiation**

<sup>1</sup>Ilyushchenko V.V., <sup>2</sup>Kukin N.S., <sup>2</sup>Nikitin A.K.

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

<sup>2</sup>Institute of Engineering Physics, Serpukhov, Russia

The main problem of identification systems is the ability to copy the identification key to obtain unauthorized access. The use of optical physical unclonable functions (PUF) as an identification key excludes the possibility of copying the key but it leads to increasing the complexity both the hardware and software of the identification system.

Optical PUF are speckle images and if obtained by passing coherent radiation through a translucent object they represent the superposition of spatial modes of coherent radiation with a light-shadow imprint of a macro- and interference pattern of the micro-structures of a translucent object. Thus, speckle images are a consequence of both classical and quantum processes of interaction of coherent radiation with a translucent substance. This fact guarantees the practical impossibility of creating its physical copies. Speckle images are often regarded as noise [1]. The noise-like nature allows us to consider optical PUF as a good basis for creating identification systems [2].

An algorithm for extracting identification information from the speckle image of the identification key can be constructed without using the procedure for comparing this image with the standards previously recorded in the database [3]. This makes it possible to abandon the storage of reference images and to exclude the possibility of their unauthorized copying and use to obtain unauthorized access.

Identification systems based on the processing of speckle images of the identification key allow to exclude the possibility of copying the key, which greatly increases the protection against unauthorized access.

References:

1. Andreev A.L., Andreeva T.B., Kompanets I.N., Zalyapin N.V., Starikov, R.S. Speckle-noise suppression using electro-optical cell with helix-free ferroelectric LC // Journal of Physics: Conference Series, 2016. V.737(1).
2. Kukin Nikolay S. Building identification systems based on an algorithm for optimally extracting information from physically non-cloned optical functions// Journal News of Institute of Engineering Physics, 2019. № 3 (53). – PP. 52-55.

3. Nikitin Andrey K., Kukin Nikolay S. Algorithm for object identity by images made under constant conditions // Journal News of Institute of Engineering Physics, 2016. №4(42). – PP. 32-35

### **Использование сверточных нейронных сетей для образов объектов на спутниковых снимках**

<sup>1</sup>Касатиков Н.Н., <sup>2</sup>Брехов О.М., <sup>1</sup>Желаннов С.А., <sup>1</sup>Гомозов О.А., <sup>1</sup>Цибин А.В.  
<sup>1</sup>НИИ ТП, <sup>2</sup>МАИ, г. Москва, Россия

Для распознавания объектов местности на спутниковых изображениях было использовано несколько методов. По результатам многих исследований в том числе и наших, опубликованных на конференции Авиация и космонавтика 2019 были получены результаты, показывающие оправданность выбора метода сверточных нейронных сетей.

В работе, протестированы четыре технологии распознавания образов: алгоритм Виолы-Джонса, SURF-каскад, алгоритм PICO и сверточные нейронные сети. На сегодняшний день сверточные нейронные сети получили достаточно широкое распространение и показывают достаточно убедительные результаты. Немного размытые изображения, а также изображения в низком качестве не являются преградой для сверточных нейронных сетей. Использование нейронных сетей позволяет ускорить процесс и качество будет выше.

Создав базу данных из заданных объектов, мы получаем быстрые и точные результаты, точность которых может доходить до 90%, все зависит от полноты базы.

Мы в нашей работе использовали язык Python из-за его скорости и популярности на данный момент. Так же были проведены тестовые работы на языке C#. Библиотеки, используемые в работе Keras и TanserFlow.

При распознавании образов объектов может применяться несколько видов. Классификация по форме, положению или по цвету. В нашей работе мы занимаемся классификацией объектов по форме, потому что считаем более подходящим для антропогенных сооружений.

Правильно и быстро распознанные здания, в том числе объекты здравоохранения, спортивные сооружения, объекты энергетики, гидроэлектростанции могут помочь как можно быстрее выполнить поставленные задачи, которые могут улучшить качество жизни людей.

При распознавании образов объектов может применяться несколько видов. Классификация по форме, положению или по цвету. В нашей работе мы занимаемся классификацией объектов по форме, потому что считаем более подходящим для антропогенных сооружений.

Литература:

1. 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» Методы нейронных сетей при распознавании образов антропогенных объектов. Касатиков Н.Н., Брехов О.М., Токарев А.В., Желанов С.А.

2. <https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/osnovy-nejronnyh-setej-algoritmy-obuchenie-funkcii-aktivacii-i-poteri/>

### **Using convolutional neural networks for object images in satellite images**

<sup>1</sup>Kasatikov N.N., <sup>2</sup>Brekhov O.M., <sup>1</sup>Jelannov S.A., <sup>1</sup>Gomozov O.A., <sup>1</sup>Cibin A.V.  
<sup>1</sup>NII TP, Moscow, Russia  
<sup>2</sup>MAI, Moscow, Russia

Several methods have been used to recognize terrain objects in satellite images. According to the results of many studies, including ours, published at the conference Aviation and Cosmonautics 2019, results were obtained showing the justification for choosing the method of convolutional neural networks.

In the work, four image recognition technologies were tested: Viola-Jones algorithm, SURF-cascade, PICO algorithm and convolutional neural networks. Today, convolutional neural networks are widely used and show quite convincing results. Slightly blurry images, as well as images in low quality, are not an obstacle for convolutional neural networks. The use of neural networks allows you to speed up the process and the quality will be higher.

Having created a database from the given objects, we get fast and accurate results, the accuracy of which can reach up to 90%, it all depends on the completeness of the database.

We used Python languages in our work because of its speed and popularity at the moment. Test work was also carried out in the C # language. Libraries used by Keras and TanserFlow.

When recognizing object patterns, several types can be used. Classification by shape, position or color. In our work, we are engaged in the classification of objects by shape, because we consider it more suitable for anthropogenic structures.

Correctly and quickly recognized buildings, including healthcare facilities, sports facilities, energy facilities, hydroelectric power plants, can help to complete tasks as quickly as possible, which can improve the quality of life of people.

When recognizing object patterns, several types can be used. Classification by shape, position or color. In our work, we are engaged in the classification of objects by shape, because we consider it more suitable for anthropogenic structures.

### **Математическое моделирование алгоритмов адаптивного конфигурирования бортовой системы видеоконтроля**

Климов Д.И., Губайдуллин И.Р., Вирясова А.Ю., Мамедов Т.Т.  
АО «РКС», г. Москва, Россия

В настоящее время активно развиваются системы видеоконтроля, которые позволяют осуществлять видеонаблюдение технологических процессов происходящих на борту космических аппаратов и ракет-носителей. Одними из важнейших характеристик такой системы являются информативность и вероятность битовой ошибки.

Обладание свойством адаптивности системы видеоконтроля может улучшить вышеуказанные характеристики. С этой целью в процессе функционирования системы необходимо обеспечить непрерывное извлечение текущей информации о состоянии системы и использование её для переконфигурирования параметров формирования и передачи данных.

Таким образом, существует необходимость разработки алгоритмов, которые будут определять способ формирования данных, изменять параметры видеокамеры (разрешение, частота кадров) и передающего устройства (тип модуляции и помехозащищенного кодирования) в зависимости от параметров передающего устройства и изменений изображения.

Для обработки и анализа изображений применяется алгоритм, целью которого является реагирование на изменение цветового баланса, фокусировки, направления обзора и масштаба изображения.

Алгоритм обработки и анализа изображения работает следующим образом: необходимо чтобы изначально поступали эталонные изображения, на которых будет обучаться нейронная сеть. Затем при возникновении изменений изображения сеть будет информировать блок принятия решений для изменения параметров видеокамеры, с которой поступило изображение.

Система видеоконтроля применяя алгоритмы адаптивности, анализирует содержимое изображения, его объем и разрешение, и обладая данными о состоянии канала передачи данных, решает задачу многопараметрической адаптации для достижения наилучшего уровня связи за счет выбора способа кодирования, модуляции, мощности сигнала, разрешения изображения видеокамер, частоты кадров, обеспечивающих наилучшее качество переданного видеопотока.

Литература:

1. M. Ibkhalal Applications of neural networks to digital communications – a survey // Signal Processing 80, 2000. pp. 1185-1215.
2. O’Shea T. & Hoydis J. An introduction to deep learning for the physical layer. // IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking 3, 2017. pp. 563-575.
3. Shun Kojima, Kazuki Maruta , Chang-Jun Ahn Adaptive Modulation and Coding Using Neural Network Based SNR Estimation // SPECIAL SECTION ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR PHYSICAL-LAYER WIRELESS COMMUNICATIONS 7, 2019.

4. J. Deng, W. Dong, R. Socher, L.-J. Ли, К. Ли и Л. Фей-Фэй. ImageNet: крупномасштабная база данных иерархических изображений. В CVPR, 2009 г.

### **Mathematical modeling of algorithms of adaptive configuration on board videocontrol system**

Klimov D.I., Gubaidullin I.R., Viryasova A.U., Mamedov T.T.  
JSC "RSS", Moscow, Russia

Currently, video monitoring systems are actively developing, which allow for video surveillance of technological processes occurring on board spacecraft and launch vehicles. One of the most important characteristics of such a system is the information content and the probability of a bit error.

Having the adaptability property of a video monitoring system can improve the above characteristics. For this purpose, during the operation of the system, it is necessary to ensure the continuous extraction of current information about the state of the system and use it for reconfiguring the parameters of data generation and transmission.

Thus, there is a need to develop algorithms that will determine the method of data generation, change the parameters of the video camera (resolution, frame rate) and the transmitting device (type of modulation and noise-proof coding) depending on the parameters of the transmitting device and image changes.

For image processing and analysis, an algorithm is used to respond to changes in color balance, focus, viewing direction, and image scale.

The algorithm is used for image processing and analysis works as follows: it is necessary that the reference images are initially received, on which the neural network will be trained. Then, when the image changes occur, the network will inform the decision-making unit to change the parameters of the video camera from which the image was received.

The video monitoring system, using adaptive algorithms, analyzes the image content, its volume and resolution, and having data on the state of the data transmission channel, solves the problem of multiparametric adaptation to achieve the best level of communication by choosing the encoding method, modulation, signal power, image resolution of video cameras, frame rate providing the best quality of the transmitted video stream.

### **Линеаризация целевой функции в регрессионных задачах методом сингулярных разложений**

Мосин В.Г.  
СамГТУ, г. Самара, Россия

В задачах прогнозирования широко используются методы линейной регрессии (см [1]), которые позволяют на основании имеющейся обучающей выборки прогнозировать значение целевой функции в зависимости от значений наблюдаемых признаков. Но целевая функция, как правило, не является линейной функцией признаков. Наоборот, как правило, она нелинейна. Один из способов преодолеть нелинейность целевой функции состоит в разбиении пространства объектов на фрагменты и построении на каждом фрагменте отдельной модели, после чего возникает серия линейных моделей, совокупность которых хорошо приближает целевую функцию.

Однако специалистам по машинному обучению хорошо известно, что такое «проклятие размерности». Допустим, целевая функция зависит от 10 признаков, каждый из которых мы разбиваем на 10 участков. Тогда в пространстве объектов возникает  $1e10$  фрагментов, что приводит к необходимости обучить  $1e10$  моделей. Допустим также, что каждая модель учится 1 секунду. Тогда вся совокупность будет учиться  $1e10$  секунд. Но это 317 лет, и то, что теоретически должно давать нам хороший прогноз, дает его в абсолютно неприемлемые сроки.

Чтобы преодолеть это явление, мы выполняем сингулярное разложение (см. [2], [3]) матрицы данных (исключая саму целевую функцию, только признаки)  $X = U\Sigma V^{-1}$ , после чего в качестве новых признаков выбираем  $X' = U\Sigma$ . Здесь столбцы признаков упорядочены по старшинству сингулярных значений. Поэтому для качественного прогноза с высоким коэффициентом детерминации нам достаточно разбить на участки лишь первые несколько

признаков. Разбиение одного или двух старших признаков, как правило, дает существенную прибавку точности прогноза.

Литература:

1. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ. М.: Вильямс И.Д., 2019.
2. Голуб Дж., Ван-Лоун Ч. Матричные вычисления. М.: Мир. 1999.
3. Логинов Н.В. Сингулярное разложение матриц. М.: МГАПИ. 1996.

### **Linearization of the target function in regression problems by the SVD method**

Mosin V.G.

SamGTU, Samara, Russia

In forecasting problems, linear regression methods are widely used, which make it possible to predict the value of the target function depending on the values of the observed features based on the available training sample. But the target function is usually not a linear feature function. On the contrary, as a rule, it is nonlinear. One way to overcome the nonlinearity of the target function is to divide the object space into fragments and build a separate model on each fragment, after which a series of linear models arises, the combination of which approximates the target function well.

However, machine learning experts are well aware of what the "curse of dimensionality" is. Let's say that the target function depends on 10 features, each of which we divide into 10 sections. Then  $1e10$  fragments appear in the object space, which leads to the need to train  $1e10$  models. Let's also assume that each model learns for 1 second. Then the whole population will learn  $1e10$  seconds. But this is 317 years, and what should theoretically give us a good forecast, gives it in an absolutely unacceptable time frame.

To overcome this phenomenon, we perform a singular value decomposition of the data matrix (excluding the target function itself, only the features)  $X = U\Sigma V$ , after which we choose  $X' = U\Sigma'$  as the new features. Here, the feature columns are ordered by the seniority of the singular values. Therefore, for a high-quality forecast with a high coefficient of determination, it is enough to divide only the first few features into sections. Splitting one or two features, it gives a significant increase in the accuracy of the forecast.

### **О повышении надежности самомаршрутизирующегося аналого-цифрового преобразователя на основе нейронной сети**

Наборщиков А.А., Южаков А.А.

ПНИПУ, г. Пермь, Россия

Работа посвящена разработке метода, повышает качество и надежность работы самомаршрутизирующегося АЦП на основе нейронной сети (САЦП НС) [1]. САЦП НС позволяет реализовать АЦП потоковой динамической архитектуры (ПДА), что позволяет изменять разрядность проводимого преобразования, регулируя скорость обработки входного сигнала [2].

Структура САЦП НС описана в [3], принципы самомаршрутизации описаны в [1], а метод «эхо-локации» в [4].

В работе [5] предложен метод поиска, отказавшего ОИН, на основе анализа запрещенных состояний. В настоящее время достаточно популярны принципы калибровки элементов АЦП, т.к. они позволяют оценивать их состояние и корректировать соответствующие веса. Архитектура САЦП НС с реализованным методом «эхо-локации» позволяет организовать мажоритарную систему путем формирования трех ИАЦП в рамках обработки одного сигнала. Сравнение в такой мажоритарной системе производится на уровне ОИН, отвечающих за одни и те же разряды, а не на уровне N-битных цифровых чисел. Это позволяет оперативно корректировать вес выделенного ОИН на заданную величину, при выявлении рассогласования в процессе диагностики. Если интегральная величина поправки превышает пороговое значения, то данный ОИН формирует флаг неисправности.

Таким образом, получаем систему с повышенным уровнем надежности, которая позволяет диагностировать отказ и адаптируется к нему посредством калибровки или отключения неисправных ОИН. Недостатком системы является необходимость иметь большее количество ОИН для возможности формирования мажоритарных ИАЦП.

Литература:

1. Посягин А.И., Южаков А.А. Самомаршрутизация сигналов в аналого-цифровом преобразователе на основе нейронной сети // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2014. Т. 57. №5. С.38-43.

2. Матушкин Н.Н., Южаков А.А. Измерительные преобразователи на основе потоковой динамической архитектуры // Известия ВУЗов. Приборостроение. 1994. №1. С.16-21.

3. Посягин А.И., Южаков А.А. Разработка аналого-цифрового преобразователя на основе нейронной сети // Электротехника. 2012. № 11. С. 18-24.

4. Макагонов Н.Г., Посягин А.И., Южаков А.А. Принципы самомаршрутизации сигналов в аналого-цифровом преобразователе на основе однослойной нейронной сети // Электротехника. 2016. № 11. С. 3-6.

5. Кацко Е.В., Посягин А.И. Диагностика в аналого-цифровом преобразователе на основе нейронной сети // Прикладная математика, механика и процессы управления. 2013. Т.1. С.295-303.

### **On increasing the reliability of a self-routing analog-to-digital converter based on a neural network**

Naborshchikov A.A., Yuzhakov A.A.  
PNRPU, Perm, Russia

The work is devoted to the development of a method that improves the quality and reliability of a self-routing ADC based on a neural network (SRADC NN) [1]. SRADC NN allows to implement the ADC of the streaming dynamic architecture (SDA), which allows you to change the bit depth of the conversion, adjusting the processing speed of the input signal [2].

The structure of the SRADC NN is described in [3] (Figure 1), the principles of self-routing are described in [1], and the "echo-location" method is described in [4].

In [5], a method of searching for a failed BMN is proposed, based on the analysis of forbidden states. At the present, the principles of calibration of ADC elements are quite popular, since they allow assessing their condition and adjusting the corresponding weights. The architecture of the NN SADC with the implemented "echo-location" method allows to organize a majority system by forming three IADCs within the framework of processing one signal. Comparison in such a majority system is performed at the level of the BMN, which are responsible for the same bits, but not at the level of N-bit digital numbers. This allows to quickly adjust the weight of the selected SPE by a given value, when a mismatch is detected in the diagnostic process. If the integral value of the correction exceeds the threshold value, then this BMN generates a fault flag.

Thus, a system with an increased level of reliability is obtained, which allows not only identifying a failure, but also adapting to it by means of calibration or disconnection of faulty BMNs. The disadvantage is the need to have a larger number of BMNs to be able to form majority IADCs.

### **Повышение отказоустойчивости САУ с помощью применения алгоритмов искусственного интеллекта**

<sup>1</sup>Остапенко С.В., <sup>2</sup>Южаков А.А.

<sup>1</sup>ОДК-СТАР, <sup>2</sup>ПНИПУ, г. Пермь, Россия

Разработчики авиационных двигателей постоянно усложняют условия эксплуатации, повышают требования к САУ по уровням стойкости воздействия внешних возмущающих факторов. При этом требуемые показатели надежности только увеличиваются. Следовательно, огромную важность получает способность САУ гарантированно обеспечить продолжение выполнения задачи без потери функции, определять отказ в канале измерения (отказ конкретного экземпляра датчика), проводить реконструкцию структуры системы.

Необходимым условием отказоустойчивости системы является наличие в ней структурной избыточности [1]. Увеличение уровня избыточности приводит к росту количества технических компонентов, которые генерируют увеличенный поток отказов, снижающий наработку на отказ системы в целом. После обнаружения отказа в канале измерения должна быть решена задача гарантированной локализации отказа конкретного датчика и последующей реконфигурации системы. Обычно такая задача решается с использованием мажоритарной логики. Но эти методы обладают статическими характеристиками в

анализируемых каналах, основываются на экспертных знаниях и не учитывают изменения характеристик объекта управления и изменения условий эксплуатации САУ. Одним из возможных способов обнаружения отказа, без увеличения избыточности технических компонентов, является построение в «реальном» времени модели двигателя [2]. Данный способ требует наличия качественных знаний об объекте управления, которые можно получить только при устоявшемся серийном производстве и большом опыте эксплуатации. При использовании встроенной математической модели погрешность расчета вектора состояния двигателя находится в пределах 2...5%. А такая точность критикуется разработчиками двигателей.

В настоящий момент ведутся работы по поиску оптимального алгоритма обнаружения аномалий в САУ двигателя с минимальной структурной избыточностью и максимальной гарантией локализации отказа. Математические модели создаются не на базе заранее известных систем уравнений, описывающих объект управления, а с помощью различных методов машинного обучения. Такой подход представляется более перспективным, так как модель формируется на основе реально существующих связей между входом и выходом во всех диапазонах изменения режимов и условий функционирования.

В работе рассмотрены основные регрессионные методы классического машинного обучения. Достигнуты результаты  $R^2$  в диапазоне [0.95; 0.999], средняя абсолютная погрешность прогнозирования в диапазоне [0.5; 4]% по различным параметрам вектора состояния объекта управления. Предлагаются методы с применением алгоритмов глубокого обучения, на базе нейронных сетей, что обеспечивает требуемую точность прогнозирования.

Конечный планируемый результат исследования – создание методологии построения математической модели с максимально высоким уровнем гарантированной локализации отказов без увеличения структурной избыточности для различных объектов управления.

Литература:

1. Интеллектуальные системы управления и контроля газотурбинных двигателей / под ред. академика С.Н. Васильева. М.: Машиностроение, 2008. 550 с.
2. Системы автоматического управления авиационными газотурбинными двигателями / под ред. О.С. Гуревича. М.: Торус Пресс, 2010. 264 с. (Труды ЦИАМ; No 1346).

### **Improving the fault tolerance of ACS using artificial intelligence algorithms**

<sup>1</sup>Ostapenko S.V., <sup>2</sup>Yuzhakov A.A.  
<sup>1</sup>ODK-STAR, <sup>2</sup>PNRPU, Perm, Russia

Developers of aircraft engines are constantly complicating the operating conditions, increasing the requirements for ACS in terms of the levels of resistance to external disturbing factors. At the same time, the required reliability indicators only increase. Therefore, the ability of the ACS to guarantee the continuation of the task without loss of function, to determine a failure in the measurement channel (failure of a specific sensor instance), to reconfigure the system structure is of great importance.

A necessary condition for the fault tolerance of the system is the presence of structural redundancy in it [1]. An increase in the level of redundancy leads to an increase in the number of redundant components that generate an increased flow of failures, which reduces the time to failure of the system as a whole. After detecting a failure in the measurement channel, the problem of guaranteed localization of the failure of a specific sensor and subsequent reconfiguration of the system should be solved. Usually such a problem is solved using majority logic. But these methods have static characteristics in the analyzed channels, are based on expert knowledge and do not take into account changes in the characteristics of the control object and changes in the operating conditions of the ACS. One of the possible ways to detect a failure, without increasing the redundancy of technical components, is to build an engine model in "real" time [2]. This method requires high-quality knowledge about the control object, which can be obtained only with established serial production and extensive operational experience. When using the built-in mathematical model, the error in calculating the engine state vector is within 2...5%. And this accuracy is criticized by engine developers.

At the moment, work is underway to find the optimal algorithm for detecting anomalies in the engine ACS with minimal structural redundancy and maximum guarantee of failure localization. Mathematical models are created not on the basis of previously known systems of equations describing the control object, but using various machine learning methods. This approach seems to be more promising, since the model is formed on the basis of real-world connections between input and output in all ranges of changes in modes and operating conditions.

The paper considers the main regression methods of classical machine learning. R2 results were achieved in the range [0.95; 0.999], the average absolute error of forecasting in the range [0.5; 4]% for various parameters of the state vector of the control object. Methods are proposed using deep learning algorithms based on neural networks, which provides the required prediction accuracy.

The final planned result of the research is the creation of a methodology for constructing a mathematical model with the highest possible level of guaranteed localization of failures without increasing structural redundancy for various control objects.

References:

1. Intelligent control and monitoring systems of gas turbine engines / ed. academician S. N. Vasilyeva. M.: Mechanical Engineering, 2008. 550 p.
2. Automatic control systems for aviation gas turbine engines / edited by O. S. Gurevich. Moscow: Torus Press, 2010. 264 p. (Proceedings of the CIAM; No. 1346).

### **Решение задачи о командной навигации с помощью мини пакетного адаптивного метода оптимизации, применяемого в машинном обучении**

Пантелеев А.В., Лобанов А.В.

МАИ, г. Москва, Россия

Рассматривается применение методов глобальной оптимизации, используемых в машинном обучении, для нахождения оптимального управления с неполной обратной связью с помощью разложения сигналов управления по ортонормированной системе базисных функций, заданных на множестве возможных состояний динамической системы. Задачу можно формализовать, как задачу параметрической оптимизации, которая решается с помощью разработанного авторами метода условной глобальной оптимизации нулевого порядка – «мини пакетного адаптивного метода случайного поиска» [1].

Задача командной навигации заключается в синхронном приведении группы объектов в фиксированное конечное состояние [2]. В начальный момент времени задано множество начальных состояний. Момент окончания функционирования системы не задан. Определен функционал качества управления отдельной траекторией. Ставится задача минимизации среднего значения функционала на множестве возможных начальных состояний. Оптимальное управление ищется в виде функции насыщения, позволяющей учесть ограничения на управление. Аргументы функции насыщения предлагается искать в виде линейной комбинации заданных базисных функций. В качестве базисных функций выбраны косинусоиды.

Для решения задачи предлагается использовать хорошо зарекомендовавший себя метод глобальной оптимизации нулевого порядка – «мини пакетный адаптивный метод случайного поиска» [3,4], который использует идеи метода стохастического градиентного спуска (SGD) и мини пакетного градиентного спуска [5]. Основная идея данного метода заключается в том, чтобы вместо всех траекторий, исходящих из заданного множества начальных состояний, использовать только их часть, которая образует мини пакет (обучающую выборку). При этом подбирается объем мини пакета и генерируется множество из попарно несовпадающих начальных состояний. Данный метод позволяет сократить время расчетов, получая приемлемый результат.

В работе разработана стратегия, пошаговый алгоритм и соответствующее программное обеспечение приближенного решения задачи поиска оптимального управления нелинейными непрерывными детерминированными динамическими системами совместного оценивания и управления в условиях неопределенности задания начальных условий. Приведенный алгоритм и программа апробированы на задаче командной навигации. Исследовано влияние размера мини пакета на качество полученного результата. Даны рекомендации по выбору параметров алгоритма.

Литература:

1. Пантелеев А. В., Лобанов А. В. Мини пакетный метод адаптивного случайного поиска для параметрической идентификации динамических систем // Автоматика и Телемеханика. 2020. № 11. С. 114–137.
2. Jeon I.-S., Lee J.-I. Homing Guidance Law for Cooperative Attack of Multiple Missiles // Journal of Guidance, Control and Dynamics. 2010. № 1 (33). P. 275–280.
3. Panteleev A.V., Lobanov A.V. The mini-batch adaptive method of random search (MAMRS) for parameters optimization in the tracking control problem // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 927. 012025.
4. Panteleev A.V., Lobanov A.V. Application of the mini-batch adaptive method of random search (MAMRS) in problems of optimal in mean control of the trajectory pencils // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 1925. 012006.
5. Пантелеев А.В., Лобанов А.В. Градиентные методы оптимизации в машинном обучении идентификации параметров динамических систем // Моделирование и анализ данных. 2019. Том 9. № 4. С. 88–99.

**Solving the command navigation problem using a mini-batch adaptive optimization method used in machine learning**

Panteleev A.V., Lobanov A.V.

MAI, Moscow, Russia

We consider the application of global optimization methods used in machine learning to find the optimal control with incomplete feedback using the expansion of control signals in terms of an orthonormal system of basis functions given on the set of possible states of a dynamical system. The problem can be formalized as a parametric optimization problem, which is solved using the method of zero-order conditional global optimization algorithm developed by the authors - "mini-batch adaptive random search method" [1].

The task of command navigation is to synchronously bring a group of objects to a fixed final state [2]. At the initial moment of time, a set of initial states is given. The terminal time of the system operation is not specified. The functional of the quality of control of a separate trajectory is determined. The problem is posed of minimizing the average value of the functional on the set of possible initial states. The optimal control is sought in the form of a saturation function that allows one to take into account the constraints on control. It is proposed to search for the arguments of the saturation function in the form of a linear combination of the given basis functions. Cosine waves are chosen as basic functions.

To solve the problem, it is proposed to use the well-proven method of zero-order global optimization - "mini-batch adaptive random search method" [3,4], which uses the ideas of the method of stochastic gradient descent (SGD) and mini-batch gradient descent [5]. The main idea of this method is to use only a part of them, which forms a mini-batch (training sample), instead of all trajectories emanating from a given set of initial states. In this case, the size of the mini-batch is selected and a set of pairwise non-coinciding initial states is generated. This method allows you to reduce the calculation time, while obtaining an acceptable result.

The paper developed a strategy, a step-by-step algorithm and the corresponding software for an approximate solution to the problem of finding optimal control for nonlinear continuous deterministic dynamical systems of joint estimation and control under uncertainty in setting the initial conditions. The presented algorithm and program have been tested on the task of command navigation. The influence of the mini-batch size on the quality of the result is investigated. Recommendations on the choice of the algorithm parameters are given.

References:

1. Panteleev A.V., Lobanov A.V. Mini-batch adaptive random search method for the parametric identification of dynamic systems // Autom. Remote Control, 81:11 (2020), P. 2026–2045.
2. Jeon I.-S., Lee J.-I. Homing Guidance Law for Cooperative Attack of Multiple Missiles // Journal of Guidance, Control and Dynamics. 2010. № 1 (33). P. 275–280.
3. Panteleev A.V., Lobanov A.V. The mini-batch adaptive method of random search (MAMRS) for parameters optimization in the tracking control problem // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 927. 012025.

4. Pantelev A.V., Lobanov A.V. Application of the mini-batch adaptive method of random search (MAMRS) in problems of optimal in mean control of the trajectory pencils // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 1925. 012006.

5. Pantelev A.V., Lobanov A.V. Gradient Optimization Methods in Machine Learning for the Identification of Dynamic Systems Parameters. // Modelling and Data Analysis, 2019. Vol. 09, no. 4, pp. 88–99. doi:10.17759/mda.2019090407

### **Элементы концепции цифрового двойника гидропривода**

Пузанов А.В.

КГТА, г. Ковров, Россия

Создание гидроприводов и гидропередаточной техники нового поколения требует повышения научно-технического уровня проектирования и производства. Повышение технических и эксплуатационных характеристик гидроприводов определяет необходимость реализации новых принципов разработки с более глубоким теоретическим анализом принципов работы гидроприводов.

Переход от традиционных схем проектирования (доводка продуктов/изделий до требуемых характеристик на основе натурных испытаний, 5 итераций в среднем) к новой парадигме цифрового проектирования и моделирования – технологии разработки и применения цифровых двойников (Digital Twin), обеспечивающей при экспертном сопровождении, как правило, прохождение с первого раза физических и натурных испытаний (1 итерация), определение критических зон и критических характеристик для мониторинга на всех этапах жизненного цикла продукта / изделия.

Применительно к разработке гидросистем, гидропередаточной и гидроприводов концепция цифровых двойников подразумевает реализацию двух основных подходов: мультимасштабность и мультифизичность (моделирование на макро- и микроуровнях).

На макромоделях обычно проводится схемная оптимизация работы системы в целом, отсоединяется взаимовлияние компонентов гидропередаточной.

Мультифизичность цифрового двойника гидропривода обеспечивают модели микроуровня. Исходными данными для них являются результаты моделирования на макроуровне. Спектр решаемых задач: кинематика, прочность, динамика жидкости, электромагнетизм, тепломассообмен и т.д., а также их комбинация.

Концепция цифровых двойников позволяет более скрупулезно исследовать свойства целевого объекта, а также проанализировать взаимовлияние системных, конструктивных и технологических параметров изделия и параметров внешней среды.

Предложенный подход к разработке гидроприводов позволяет увеличить адекватность моделей, повысить их точность за счет снижения допущений.

Литература:

1. Цифровое проектирование, математическое моделирование и управление жизненным циклом изделия или продукции (SmartDesign). URL: [https://digitech.ac.gov.ru/technologies/new\\_manufacturing\\_technologies/tsifrovoye-proektirovanie](https://digitech.ac.gov.ru/technologies/new_manufacturing_technologies/tsifrovoye-proektirovanie).

2. Современное инженерное образование: учеб. пособие/А.И. Боровков [и др.]. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 80 с.

3. Боровков А. «Умные» цифровые двойники – основа новой парадигмы цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения/А. Боровков // Трамплин к успеху. 2018, №13. –С. 12-16.

4. Пузанов А.В. Передовые технологии разработки и производства приводов и систем управления [Текст]: монография/А.В. Пузанов. – Ковров: ФГБОУ ВО «КГТА им. В.А. Дегтярева», 2020. 88 с.

5. Пузанов А.В. Методика формирования CAE-моделей на примере конструкторско-технологической проработки плунжера форсированной гидромашины/А.В. Пузанов// Информатика - 2017, №2. -С. 37-44.

6. Пузанов А.В. Моделирование индикаторной диаграммы аксиально-плунжерной гидромашины/А.В. Пузанов, Е.А. Ершов//Вестник Брянского государственного технического университета. 2017, № 3 (56). –С. 29-35.

## **Elements of the digital twin concept of hydraulic drive**

Puzanov A.V.

KSTA, Kovrov, Russia

The creation of hydraulic drives and hydraulic transmissions for new generation mobile equipment requires an increase in the scientific and technical level of design and production. Improving the technical and operational characteristics of hydraulic drives determines the need to implement new development principles with a deeper theoretical analysis of the principles of hydraulic drives.

The transition from traditional design schemes (fine-tuning products / products to the required characteristics based on field tests, 5 iterations on average) to a new paradigm of digital design and modeling - technology for the development and use of digital twins (Digital Twin), which, as a rule, provides, with expert support, passing the first time physical and full-scale tests (1 iteration), determination of critical areas and critical characteristics for monitoring at all stages of the product/product life cycle.

With regard to the development of hydraulic systems, hydraulic transmissions and hydraulic drives, the concept of digital twins implies the implementation of two main approaches, multiscale and multiphysics (modeling at the macro and micro levels).

On macromodels, circuit optimization of the system as a whole is usually carried out, the mutual influence of hydraulic transmission components is monitored.

The multiphysics of the digital twin of the hydraulic drive is provided by micro-level models. The initial data for them are the results of modeling at the macro level. The range of tasks to be solved: kinematics, strength, fluid dynamics, electromagnetism, heat and mass transfer, etc., as well as their combination.

The concept of digital twins allows a more scrupulous study of the properties of the target object, as well as the analysis of the mutual influence of the system, design and technological parameters of the product and the parameters of the external environment.

The proposed approach to the development of hydraulic drives makes it possible to increase the adequacy of the models, to increase their accuracy by reducing the assumptions.

## **Разработка демонстратора цифрового двойника ГТД**

Сальников А.В.

ЦИАМ, г. Москва, Россия

В процессе разработки ГТД создается большое количество различных математических моделей разного уровня сложности в разных дисциплинах анализа [1]. При этом используется множество методик, описывающих процесс формирования и конкретизации конструкции двигателя и его узлов с учетом предъявляемых требований. Таким образом процесс проектирования ГТД является сложной, комплексной, весьма трудоемкой и плохо формализуемой задачей. Одной из целей использования технологии цифровых двойников (ЦД) на этапе проектирования ГТД является формализация процесса проектирования, всех используемых моделей и методик, увязывание их между собой и объединение в едином информационном пространстве [2, 3]. Это позволит сделать разработку ГТД более «прозрачной», структурированной, снизит трудозатраты и уменьшит время создания двигателя.

Данная работа посвящена разработке демонстратора цифрового двойника ГТД в облике малоразмерного ТРД упрощённой конструкции с тягой 20 кгс. Использование компоновки ТРД в совокупности с допустимым упрощением конструкции узлов и деталей (при сохранении работоспособности) позволяет решить эту актуальную задачу в приемлемые сроки с минимальными трудозатратами. ЦД базируется на упрощённой цифровой платформе (ЦП), созданной в ЦИАМ, с собственным интерфейсом.

Демонстратор ЦД включает в себя формализованную логику проектирования ТРД выбранной схемы (включая технологию МДО), всю совокупность используемых математических моделей и структуру их взаимодействия (порядок запуска, обмен данными и т.д.). Каждая расчетная модель связана с матрицей требований, что позволяет отслеживать их выполнение на всех этапах проектирования.

Все модели (CAD и CAE) формализованы, параметризованы и автоматизированы. Поэтому в процессе проектирования конечный пользователь не модифицирует CAD и CAE модели, а изменяет блоки входных данных и запускает расчёт.

Формализация и автоматизация делает структуру ЦД модульной и позволяет при необходимости легко заменять расчетные модели и переносить ЦД на другие цифровые платформы.

Разработанный демонстратор ЦД планируется применять:

- Для разработки требований к структуре ЦД, ЦП.
- Для разработки учебно-методических материалов для ВУЗов и центров ДПО по беззертёжному 3D проектированию, МДО и ЦД ГТД.
- В качестве базы при создании цифровых двойников реальных ТРД подобной схемы.

Литература:

1. "Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др.- М: Машиностроение. "Самолеты и вертолеты. Т.IV-21. Авиационные двигатели. Кн. 3 / В.А. Скибин, В.И. Солонин, Ю.М. Темис и др.; под ред. В.А. Скибина, Ю.М. Темиса и В.А. Сосунова. - 2010. — 720 с.; ил.

2. Marr, B. What is Digital Twin Technology—And Why is It so Important? Forbes, 6 March 2017.

3. Прохоров А., Лысачев М. Боровков А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 стр., ил.

### **Development of a GTE digital twin demonstrator**

Salnikov A.V.

CIAM, Moscow, Russia

In the process of developing a gas turbine engine, a large number of different mathematical models of different levels of complexity are created in different disciplines of analysis. At the same time, many methodologies are used, that describe the process of forming and concretizing the design of the engine and its units, taking into account the requirements. Thus, the process of designing a gas turbine engine is a complex, complex, very laborious and poorly formalized task. One of the goals of using digital twins (DT) technology at the design stage of a gas turbine engine is to formalize the design process, all used models and techniques, link them together and combine them in a single information space. This will make the development of GTE more "clear", structured, reduce labor costs and reduce engine development time.

This work is devoted to the development of a digital twin of a gas turbine engine in the guise of a small-sized turbojet engine of a simplified design with a thrust of 20 kgf. The use of the turbojet engine layout in conjunction with an acceptable simplification of the design of assemblies and parts (while maintaining operability) allows you to solve this urgent problem in an acceptable time frame with minimal labor costs. The DT is based on a simplified digital platform (DP) created at CIAM with its own interface.

The DT demonstrator includes the formalized logic of the design of the turbojet engine of the selected circuit (including the MDO technology), the entire set of mathematical models used and the structure of their interaction (launch order, data exchange, etc.). Each calculation model is associated with a matrix of requirements, which allows you to track their implementation at all design stages.

All models (CAD and CAE) are formalized, parameterized and automated. Therefore, during the design process, the end user does not modify the CAD and CAE models, but changes the input data blocks and starts the calculation.

Formalization and automation makes the structure of the DT modular and allows, if necessary, to easily replace the calculation models and transfer the DT to other digital platforms.

The developed DT demonstrator is planned to be used:

- For the development of requirements for the structure of DT and DP.
- For the development of educational and methodological materials for universities on drawingless 3D design, MDO and DT GTE.
- As a basis for creating digital twins of real turbojet engines of a similar scheme.

## Концепция цифровых двойников ГТД

Сальников А.В.

ЦИАМ, г. Москва, Россия

Развитие математического моделирования и рост вычислительных мощностей приводит к всё большему внедрению на всех этапах жизненного цикла авиационных двигателей и силовых установок цифровых технологий и связанных с ними подходов [1]. Цифровые технологии условно можно разделить на две группы: математическое моделирование и автоматизация процессов. На каждом из этапов жизненного цикла ГТД эти группы технологий активно используются и взаимодействуют друг с другом.

В работе сформулировано определение цифрового двойника ГТД, приведена его функциональная схема с учетом основных этапов его жизненного цикла (проектирование, испытания, серийное производство, эксплуатации и утилизация) и дано подробное описание каждого её элемента.

Цифровой двойник базируется на цифровой платформе, которая объединяет в себе все компоненты ЦД, организует взаимосвязь между ними, формирует их иерархию, обеспечивает хранение истории изменений и взаимодействие с различными базами данных (внутренних на предприятии и внешних отраслевых), сторонними цифровыми платформами и сервисами, используемыми на всех этапах жизненного цикла с учетом их специфики [2].

Таким образом, цифровые двойники могут стать той прорывной технологией [3], которая объединит в рамках единого цифрового пространства всю совокупность математических моделей, различных цифровых сервисов и многообразие данных создаваемых, получаемых и используемых в течение всего жизненного цикла двигателя. Это объединение повысит прозрачность и понимание того, что происходит с двигателем на различных этапах его жизненного цикла, повысит характеристики, сократит время разработки и сертификации, а также снизит себестоимость его производства и эксплуатации.

Литература:

1. "Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др.- М: Машиностроение. "Самолеты и вертолеты. Т.IV-21. Авиационные двигатели. Кн. 3 / В.А. Скибин, В.И. Солонин, Ю.М. Темис и др.; под ред. В.А. Скибина, Ю.М. Темиса и В.А. Сосунова. - 2010. — 720 с.; ил.

2. Цифровая платформа CML-Bench™ разработки цифровых двойников и система управления деятельностью в области компьютерного инжиниринга. – URL: <http://fea.ru/article/cml-bench> <http://fea.ru/article/cml-bench>

3. Marr, B. What is Digital Twin Technology—And Why is It so Important? Forbes, 6 March 2017

## GTE digital twins concept

Salnikov A.V.

CIAM, Moscow, Russia

The development of mathematical modeling and the growth of computing power leads to the increasing introduction of digital technologies and related approaches at all stages of the life cycle of aircraft engines and power plants. Digital technologies can be conditionally divided into two groups: mathematical modeling and process automation. At each stage of the GTE life cycle, these groups of technologies are actively used and interact with each other.

The paper formulates the definition of the digital twin of a gas turbine engine, presents its functional diagram, taking into account the main stages of its life cycle (design, testing, serial production, operation and disposal) and gives a detailed description of each of its elements.

The digital twin is based on a digital platform that unites all the components of the DC, organizes the relationship between them, forms their hierarchy, provides storage of the history of changes and interaction with various databases (internal at the enterprise and external industry), third-party digital platforms and services used at all stages of the life cycle, taking into account their specifics.

Thus, digital twins can become that breakthrough technology that will unite within a single digital space the entire set of mathematical models, various digital services and the variety of data created, received and used throughout the entire life cycle of the engine. This combination will

increase transparency and understanding of what happens to the engine at different stages of its life cycle, increase performance, reduce development and certification times, and also reduce the cost of production and operation.

### **Разработка рекомендательной системы для сегмента b2b**

Сологуб Г.Б., Тимофеева А.А.

МАИ, г. Москва, Россия

В настоящее время в электронной коммерции наблюдается активный рост сегмента b2b, в котором услуги предоставляются юридическим лицам [4]. Рекомендательная система может помочь менеджеру по продажам автоматически подбирать релевантные товары для клиентов, чтобы продавать быстрее и успешнее.

В статьях [1,2,3,5] рассматриваются различные подходы построения рекомендаций для сферы электронной коммерции и b2b. В них представлены методы на основе коллаборативной фильтрации и применение глубоких нейронных сетей на основе энкодеров.

С математической точки зрения построение рекомендаций является задачей бинарной классификации, когда необходимо определить класс объекта 1 и 0 (купит ли товар клиент или нет). Далее после получения прогнозов, товары необходимо отсортировать по уменьшению их прогнозов. Так, для каждого клиента товары с наибольшим прогнозом будут являться его рекомендациями.

В ходе работы были рассчитаны признаки на основе коллаборативной фильтрации. Особенность их построения в том, что в качестве клиента рассматривался не конечный покупатель, а целая компания с учётом её интересов и целей. С помощью этого подхода для клиента и товаров рассчитывается мера схожести на другие товары, которые смотрели похожие на него клиенты. После дополнения данных новыми признаками была разработана модель на основе полносвязной нейронной сети, с 4 скрытыми слоями и числом выходов, равных количеству рекомендуемых товаров. Сеть создавалась с применением фреймворка Keras. Для улучшения качества предсказаний и ускорения процесса обучения к каждому слою применялась нормализация по пакетам (BatchNormalization) и прореживание (Dropout).

Для вывода наиболее релевантных товаров, рассчитывался порог, при котором прогноз модели является корректным. Для рекомендаций отбираются все товары, прогноз которых выше или равен рассчитанному ранее пороговому значению.

В ходе тестирования сети была подсчитана мера, нормированная Gini, которая показывает, насколько хорошо модель определяет метку класса относительно идеальной модели. Получено значение 0.82, что означает, что разработанная сеть достаточно близка к идеальной модели и действительно выдает релевантные рекомендации.

В итоге была разработана сеть на основе нейронной сети, а ее качество было проверено на реальных данных компании SoftwareONE, показав прирост числа продаж.

Литература:

1. Исламова, С.А. Обзор рекомендательных систем / С.А. Исламова, Н.В. Липатникова.// MODERN SCIENCE – 2019.
2. Memon Muhammad Kamal. Deep hybrid collaborative filtering for E-commerce product recommendation system / Muhammad Kamal Memon. – Master's thesis, Aalto university, school of science, 2020. – 100p.
3. Shambour Qusai. An effective recommender system by unifying user and item trust information for B2B applications / Shambour Qusai // Journal of Computer and System Sciences.– 2015.– P. 1110-1126
4. Statista [Electronic resource] / online service: provides reports and statistics on various topics. URL: <https://www.statista.com/statistics/705606/global-b2b-e-commerce-gmv/> (Date of request: 09.03.21)
5. Vlachos M. Toward interpretable predictive models in B2B recommender systems / M. Vlachos, V. G. Vassiliadis // Journal of Research and Development. – №5/6(11). – 2020. – P. 40-51.

## **Development of a recommendation system for the b2b segment**

Sologub G.B., Timofeeva A.A.

MAI, Moscow, Russia

Currently in e-commerce there is an active growth of the b2b segment, in which services are provided to legal entities [4]. A recommendation system can help a sales manager automatically match relevant products to customers in order to sell faster and more successfully.

In articles [1,2,3,5], various approaches to building recommendations for e-commerce and b2b are considered. They present methods based on collaborative filtering and the use of deep neural networks based on encoders.

From a mathematical point of view, building recommendations is a binary classification task, when it is necessary to determine the class of objects 1 and 0 (whether the customer will buy the product or not). Further, after receiving forecasts, the goods must be sorted by decreasing their forecasts. So, for each client, the products with the highest forecast will be his recommendations.

In the course of the work, features were calculated based on collaborative filtering. The peculiarity of their construction is that not the end customer was considered as a client, but the whole company, taking into account its interests and goals. Using this approach, a measure of similarity to other products viewed by similar customers is calculated for the customer and products. After adding new features to the data, a model was developed based on a fully connected neural network, with 4 hidden layers and the number of outputs equal to the number of recommended products. The network was created using the Keras framework. To improve the quality of predictions and speed up the learning process, batch normalization and dropout techniques were applied to each layer.

To display the most relevant products, the threshold was calculated at which the forecast of the model is correct. For recommendations, all products are selected, the forecast of which is higher or equal to the previously calculated threshold value.

During network testing, the normalized Gini measure was calculated, which shows how well the model determines the class label relative to the ideal model. The obtained value is 0.82, which means that the developed network is close enough to the ideal model and really gives relevant recommendations.

As a result, a network based on a neural network was developed, and its quality was tested on real data from SoftwareONE, showing an increase in the number of sales.

## **Прогнозирование суммы покупок клиента интернет-магазина при помощи методов машинного обучения**

Сологуб Г.Б., Финогенов Н.А.

МАИ, г. Москва, Россия

В настоящее время рынок электронной коммерции переживает бурный рост, интернет-магазины постепенно вытесняют офлайн-коммерцию. Чтобы увеличить прибыль, интернет-магазины могут оптимизировать затраты на маркетинговые активности, такие как скидки и другие рекламные акции, предлагая их только тем клиентам, прогнозируемая сумма покупок которых превышает соответствующие затраты. Задача прогнозирования суммы покупок является задачей регрессии и относится к классу задач обучения с учителем. В качестве обучающей выборки использовался открытый набор данных, содержащий транзакционные данные, описания товаров и групп товаров, а также данные пользователей интернет-магазина купонов [roprage.jp](http://roprage.jp). Так как клиенты покупают товары различных категорий, то возникает проблема группировки данных по соответствующим группам товаров, для решения которой использовался алгоритм перекрестной проверки на основе групп. Для решения задачи прогнозирования были построены и обучены следующие линейные модели машинного обучения: линейная, гребневая и лассо регрессии, эластичная сеть, градиентный спуск с квадратичной функцией потерь и  $L_1$  регуляризацией. Также была построена и обучена ансамблевая модель на основе деревьев решений. Для оценивания результатов использовались следующие метрики качества: коэффициент  $R^2$ , который интерпретируется как доля информации в данных, которую модель может объяснить; RMSE, которая интерпретируется как среднее расстояние между наблюдаемыми значениями и прогнозами модели. Для итоговой модели получены значения метрик качества: коэффициент  $R^2 = 0.251$ ,

RMSE – 1586 yen. Аналогичным набором данных обладает практически любой интернет-магазин, поэтому полученная модель может быть использована и для других интернет-магазинов.

Литература:

1. Хасти Т., Тибириани Р. Основы статистического обучения. — Диалектика, 2020.
2. Воронцов К. В. Комбинаторный подход к оценке качества обучаемых алгоритмов // Математические вопросы кибернетики. – 2004. – Т. 13. – С. 5-36.
3. Bishop C. M. Pattern recognition // Machine learning. – 2006. – Т. 128. – №. 9.

### **Forecasting the amount of purchases of an online store customer using machine learning methods**

Sologub G.B., Finogenov N.A.  
MAI, Moscow, Russia

Currently, the e-commerce market is experiencing rapid growth, online stores are gradually replacing offline commerce. To maximize profits, online retailers can optimize the costs of marketing activities such as discounts and other promotions by only offering those to customers who are expected to purchase more than the corresponding costs. The problem of predicting the amount of purchases is a regression problem and belongs to the class of supervised learning problems. An open dataset containing transactional data, descriptions of products and product groups, as well as data from users of the online coupon store ponpare.jp was used as a training sample. Since customers buy products of different categories, there is a problem of grouping the data by the corresponding groups of products, which was solved using a cross-validation algorithm based on the groups. To solve the forecasting problem, the following linear machine learning models were built and trained: linear, ridge and lasso regression, elastic network, gradient descent with a quadratic loss function and l1 regularization. An ensemble model based on decision trees was also built and trained. The following quality metrics were used to evaluate the results: coefficient R2, which is interpreted as the proportion of information in the data that the model can explain; RMSE, which is interpreted as the average distance between observed values and model predictions. For the final model, the values of quality metrics were obtained: coefficient R2 – 0.251, RMSE – 1586 yen. Almost any online store has a similar set of data, so the resulting model can be used for other online stores as well.

### **Использование методов машинного обучения для предсказания спроса на новые товары в интернет-магазине**

Сологуб Г.Б., Осин А.А.  
МАИ, г. Москва, Россия

В настоящее время благодаря развитию технологий обработки больших данных и машинного обучения интернет-магазины могут автоматизировать процесс закупки товаров, оптимизировать соответствующие убытки и получить дополнительную прибыль. В связи с этим особенно актуальна задача предсказания спроса на новые товары, чтобы избежать как убытков от простоя излишков товаров на складе, так и потери прибыли из-за отсутствия товара в наличии. Задача предсказания спроса на товар является задачей регрессии. Для обучения моделей были использованы данные, предоставленные компанией Ozon, о продажах товаров, о поставках товара, описания товаров и категорий товаров. Кроме того, при помощи методов data mining были собраны дополнительные данные с других сайтов, такие как характеристики товара, бренд, производитель, регион продажи, рейтинг и отзывы о товаре. В результате на предобработанных данных были обучены как линейные модели, так и ансамблевые модели, основанные на алгоритме градиентного бустинга, в частности, LightGBM и XGBoost, для которых получены метрики качества MSE — 38.48, R2 — 0.2251 и MSE — 32.05, R2 — 0.2393, соответственно. Полученные модели могут применяться не только как самостоятельные модели для прогнозирования спроса на старте продаж товара, но и для объединения с моделями, предсказывающими спрос на более продолжительный период.

Литература:

1. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction. – Springer Science & Business Media, 2009.
2. Bishop C. M. Pattern recognition //Machine learning. – 2006. – Т. 128. – No. 9. [3] Митчелл Р. Скрапинг веб-сайтов с помощью Python //М.: ДМК Пресс. – 2016.

### **Using machine learning techniques to predict the demand for new products in an online store**

Sologub G.B., Osin A.A.  
MAI, Moscow, Russia

Nowadays, thanks to the development of technologies for processing big data and machine learning, online stores can automate the process of purchasing goods, optimize the corresponding losses and generate additional profits. In this regard, the task of predicting the demand for new goods is especially relevant in order to avoid both losses from the idle time of surplus goods in the warehouse, and loss of profit due to the lack of goods in stock. The problem of predicting the demand for a product is a regression problem. To train the models, we used data provided by Ozon on product sales, product deliveries, product descriptions and product categories. In addition, using data mining methods, additional data from other sites were collected, such as product characteristics, brand, manufacturer, region of sale, rating and reviews of the product. As a result, both linear models and ensemble models based on the gradient boosting algorithm were trained on the preprocessed data, in particular, LightGBM and XGBoost, for which quality metrics MSE - 38.48, R2 - 0.2251 and MSE - 32.05, R2 - 0.2393 were obtained, respectively. The resulting models can be used not only as independent models for predicting demand at the start of sales of a product, but also for combining with models that predict demand for a longer period.

### **Разработка эффективного алгоритма параллельных вычислений для моделирования процесса обледенения стреловидного крыла с использованием решателя iceFoam**

Стрижак Сергей  
ИСП РАН, г. Москва, Россия

В ИСП РАН разработаны 3 версии решателя iceFoam на основе Эйлеравого подхода для газового потока и Лагранжевого подхода для моделирования капель и пленки воды на поверхности профиля крыла с учетом слоя льда. Во всех трех версиях решателей модель пленки воды и слоя льда, основана на теории мелкой воды [1].

Первая версия решателя iceFoam предназначена для предварительной оценки мест обледенения произвольного 3D профиля. Данный решатель полностью использует все возможности технологии MPI для проведения эффективных параллельных вычислений средствами открытого пакета OpenFOAM. Главным ограничением этого решателя является предположение, что толщина слоя льда достаточно мала и изменение поверхности профиля при обледенении пренебрежимо мало. Профиль крыла с учетом и без учета льда полагаются одинаковыми. Для проведения декомпозиции пространственной области пленки используется разработанная утилита extrudeToFilmCellDist. С целью оценки масштабирования решателя выполнялись расчет на 12-48 ядрах.

Вторая версия решателя iceDyMFoam2 разработана для моделирования обледенения как рыхлым льдом, так и гладким льдом для которого зачастую поверхность льда принимает сложные и причудливые формы. Данный решатель требует использования структурированной сетки в области поверхности крыла и наличия только одного пространственного домена для пленки. Опыт вычислений показал, что это требование ограничено максимальным числом ядер, не более 12. При дальнейшем же увеличении количества используемых ядер эффективность параллельных вычислений растет слабо и падает при 24 ядрах. Для упрощения декомпозиции пространственной области газа разработана утилита addTwoLayersTo0. Данная утилита позволяет задать расчетный домен на нулевом CPU для пленки и для двух прилегающих слоев эйлеровой сетки.

Третья версия решателя iceDyMFoam3 также позволяет учитывать влияние изменения поверхности профиля при обледенении на сам процесс обледенения. Как и первая версия, этот решатель полностью использует все возможности технологии параллельной библиотеки MPI для проведения эффективных параллельных вычислений. Параллельная реализация

границы движения льда потребовала использовании низкоуровневых функции пакета OpenFOAM. В этом случае будут узлы, которые попадут на границу нескольких доменов.

В случае использования подхода с динамической сеткой потребовалось собирать информацию об узлах, которые хранятся в нескольких доменах или на разных ядрах. Для таких узлов после локальных вычислений внутри одного домена выполнялась операция по определению нового положения узла. Делалось осреднение по всем доменам, участвующих в расчетах данного узла. Осредненные значения положение узлов, которые записаны были больше чем в одном домене, обратно распределялись по всем необходимым вычислительным ядрам.

Была выполнена серия расчетов на кластере НИЦ КИ для 5 различных профилей и 3D стреловидного крыла для различных значений диаметра капель, температуры, скорости набегающего потока, водности на разных сетках. Проведено сравнение расчета с результатами эксперимента по толщине и форме льда [2]. Ошибка не превышала более 10%.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 19-29-13016.

Литература:

1. Кошелев К.Б., Мельникова В.Г., Стрижак С.В. Разработка решателя iceFoam для моделирования процесса обледенения. Труды ИСП РАН, том 1, вып. 2, 2019 г., стр. 15–19.
2. Wright W., Rutkowski A. Validation results for LEWICE 2.0. Tech. rep., NASA, 1999, CR–1999-208690, 1-674.

### **Development of an efficient parallel computing algorithm for modeling swept wing icing using a solver iceFoam**

Strijhak S.V.

ISP RAS, Moscow, Russia

ISP RAS has developed 3 versions of the iceFoam solver based on the Euler approach for gas flow and the Lagrangian approach for modeling water droplets and a film on the surface of the wing airfoil, taking into account the ice layer. In all three versions of the solvers, the water film and ice layer model is based on the shallow water theory [1,2].

The first version of the iceFoam solver is intended for preliminary estimation of icing areas of an arbitrary 3D profile. This solver fully uses all the capabilities of the MPI technology to carry out efficient parallel computations using the OpenFOAM open package. The main limitation of this solver is the assumption that the thickness of the ice layer is sufficiently small. The extrudeToFilmCellDist utility is used to decompose the spatial region of the film. In order to evaluate the scaling of the solver, calculations were performed on 12-48 cores.

The second version of the iceDyMFoam2 solver is designed to simulate both rime ice and glaze ice for which the ice surface often takes complex and bizarre shapes. This solver requires the use of a structured mesh in the area of the wing surface and the presence of only one spatial domain for the film. Computational experience has shown that this requirement is limited by the maximum number of cores, no more than 12. With a further increase in the number of cores used, the efficiency of parallel computations grows weakly and decreases with 24 cores. To simplify the decomposition of the spatial gas domain, the addTwoLayersTo0 utility has been developed. This utility allows you to set the computational domain on the zero CPU for the film and for two adjacent layers of the Eulerian grid.

The third version of the iceDyMFoam3 solver also allows you to take into account the effect of changes in the profile surface during icing on the icing process itself. Like the first version, this solver fully uses all the capabilities of the MPI parallel library technology to perform efficient parallel computations. Parallel implementation of the ice boundary required the use of low-level functions of the OpenFOAM package. In this case, there will necessarily be nodes that fall on the border of several domains.

In the case of using the dynamic grid approach, it was necessary to collect information about nodes that are stored in several domains or on different cores. For such nodes, after local calculations within one domain, an operation was performed to determine the new position of the node. Next, we performed averaging over all domains. For the case of icing with smooth ice, the third version of the iceDyMFoam3 solver is inferior in terms of capabilities to the second version.

A series of calculations was performed on Kurchatov HPC for 5 airfoils and a 3D swept wing for variations in droplet diameter, temperature, velocity, water content on different grids. Comparison of the calculation with the results of the experiment on the thickness and shape of ice [2]. The error did not exceed 10%.

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 19-29-13016.

References:

1. Koshchev K.B., Melnikova V.G., Strijhak S.V. Development of iceFom solver for modeling ice accretion. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 32, issue 4, 2020. pp. 217–234 (in Russian).
2. Wright W., Rutkowski A. Validation results for LEWICE 2.0. Tech. rep., NASA, 1999, CR–1999-208690, 1-674.

## **Мультиагентное моделирование на базе нечетких суждений экспертов применительно к области борьбы с пандемией**

<sup>1</sup>Судаков В.А., <sup>2</sup>Сивакова Т.В.

<sup>1</sup>МАИ, <sup>2</sup>ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия

Методы моделирования поведения в социуме, как правило, базируются на вероятностных подходах, однако, получение соответствующих вероятностных оценок на практике затруднительно. Это особенно заметно в случае новых эпидемий, таких как пандемия COVID-19. Отсутствие достоверных статистических данных не позволяет проводить моделирование эпидемий с необходимой точностью прогноза.

В основе большинства современных подходов «эпидемиологическая часть» модели, основана на классической популяционной SEIR-модели Кермака-Маккендрика. С помощью системы интегро-дифференциальных уравнений описывается процесс динамики в популяции групп индивидов. Этот подход сопровождается заданием некоторого набора начальных условий и большого числа параметров, которые, как правило, определяются весьма субъективно. Именно это приводит к существенному разбросу получаемых различными исследователями результатов, что существенно снижает прогностическую ценность таких моделей.

Для выработки управленческих решений в условиях пандемий приходится применять экспертные суждения, которые зачастую носят нечеткий, расплывчатый характер и их моделирование нечеткими числами, обеспечивает учет этой неопределённости при принятии важных стратегических решений. Предлагается использовать математический аппарат функций принадлежности нечетких множеств. Особенность подхода заключается в том, что разрабатываемые модели базируются на оригинальных комбинированных нечетких методах теории принятия решений и мультиагентного моделирования. Разрабатываемая технология может стать одним из базисов для создания эффективных инструментов поддержки принятия решений в сложной эпидемиологической ситуации.

Выделим следующие модели: населенных пунктов, экономических субъектов и их отношений, контактных коммуникаций, инфицирования в условиях нечеткой информационной среды. Поведение агентов в них основано на системе ценностей, заданной на нечетких областях предпочтений. Для реализации вышеприведенных моделей будет разработано программное обеспечение дискретно-событийного моделирования.

Т.к. результаты моделирования характеризуются большим количеством критериев, то предлагается уменьшить пространство анализируемых критериев с помощью процедур агрегирования и методов вычисления общих оценок.

Прикладная значимость разрабатываемых подходов позволяет решать множество прогностических задач, включая в том числе:

- Прогноз динамики распространения заболеваемости, включая исследование зависимости от характеристик возбудителя инфекции (что может сыграть роль также для своевременной выработки адекватных мероприятий в случае других эпидемий).
- Оценку дополнительной нагрузки на инфраструктуру органов здравоохранения по мере распространения эпидемии.
- Сравнительную оценку ожидаемой эффективности различных профилактических и противоэпидемических мероприятий.

- Возможное влияние эпидемии и принимаемых мер на изменение характера жизнедеятельности и поведения людей.

- Комплексную оценку социально-экономических последствий.

- В оценке эффективности управленческих решений по рациональному управлению медицинской инфраструктурой, включая прогноз социально-экономических последствий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и CNPq (Бразилия), Фонда содействия инновациям (Россия), DBT, DST (Индия), MOST, NSFC (Китай), SAMRC (ЮАР) в рамках проекта № 20-51-80002.

Литература:

1. Четверушкин Б.Н., Судаков В.А. Факторная модель исследования сложных процессов. Доклады Академии наук. 2019,489(1),17-21.

### **Multiagent modeling based on fuzzy judgments of experts as applied to the field of combating a pandemic**

<sup>1</sup>Sudakov V.A., <sup>2</sup>Sivakova T.V.

<sup>1</sup>MAI, <sup>2</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russia

Today, methods of modeling behavior in society are usually based on probabilistic approaches, however, it is difficult to obtain appropriate probabilistic estimates in practice. This is especially noticeable in the case of new epidemics such as the COVID-19 pandemic. The lack of reliable statistical data does not allow modeling epidemics with the required forecast accuracy.

At the heart of most modern approaches, the "epidemiological part" of the model is based on the classical population-based SEIR Kermak-Mackendrick model. With the help of a system of integro-differential equations, the process of dynamics in a population of groups of individuals is described. This approach is accompanied by the setting of a certain set of initial conditions and a large number of parameters, which, as a rule, are determined very subjectively. This is what leads to a significant scatter of the results obtained by various researchers, which significantly reduces the predictive value of such models.

To develop management decisions in a pandemic, one has to use expert judgments, which are often fuzzy, vague, and their modeling with fuzzy numbers ensures that this uncertainty is taken into account when making important strategic decisions. It is proposed to use the mathematical apparatus of the membership functions of fuzzy sets. The peculiarity of the approach is that the developed models are based on the original combined fuzzy methods of decision theory and multi-agent modeling. The technology being developed can become one of the bases for creating effective decision support tools in a difficult epidemiological situation.

Models will be created: settlements, economic entities and their relations, contact communications, infection in a fuzzy information environment. The behavior of agents in them is based on a value system defined on fuzzy areas of preference. To implement the above models, discrete-event simulation software will be developed.

Since the simulation results are characterized by a large number of criteria, it is proposed to reduce the space of the analyzed criteria using aggregation procedures and methods for calculating general estimates

The applied significance of the developed approaches makes it possible to solve many predictive problems, including, but not limited to:

- Forecasting the dynamics of the spread of morbidity, including a study of the dependence on the characteristics of the causative agent of the infection (which can also play a role for the timely development of adequate measures in the event of other epidemics).

- Assessing the additional burden on health infrastructure as the epidemic spreads.

- Comparative assessment of the expected effectiveness of various preventive and anti-epidemic measures.

- The possible impact of the epidemic and the measures taken on the change in the nature of life and behavior of people.

- Comprehensive assessment of socio-economic consequences.

- In assessing the effectiveness of management decisions on the rational management of medical infrastructure, including the forecast of socio-economic consequences.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR and CNPq, FASIE, DBT, DST, MOST, NSFC, SAMRC according to the research project № 20-51-80002.

References:

1. Chetverushkin, B. N., Sudakov, V. A. (2019). Factor model for the study of complex processes. *Doklady Mathematics*, 100 (3), 514-518. doi: 10.1134 / S1064562419060036.

### **Применение метода TOPSIS для моделирования эпидемиологической обстановки на основе нечетких суждений**

Судаков В.А.

МАИ, г. Москва, Россия

Мировое сообщество уже не впервые в современной истории столкнулось с пандемией вируса. Решения в области ресурсного обеспечения борьбы с пандемиями зачастую не однозначны и спорны. Это обусловлено, с одной стороны, нехваткой ресурсов, которая вероятна в случае быстрого распространения заражения и, с другой стороны, противоречивостью и разнородностью критериев оценки последствий принимаемых решений. Поэтому актуальной является разработка методов многокритериального анализа альтернатив, направленных на решение задач поддержки принятия решений по рациональному использованию ресурсов в нечеткой информационной среде.

Результаты моделирования характеризуются десятками критериев, чтобы обеспечить эффективную оценку параметрических и структурных изменений, необходимо уменьшить пространство анализируемых критериев, для этого будут созданы процедуры агрегирования критериев и методы вычисления обобщённых оценок. Необходимо учитывать множество разнородных факторов, характеризующих пандемию, это как экономические (количественные), так и отношение населения (качественные и нечеткие) критерии. Поэтому будут использованы оригинальные комбинированные подходы на базе областей предпочтений.

Наличие значительного количества показателей (признаков, атрибутов), характеризующих с процесса; разнородность шкал, в которых формируются оценки; необходимость учета возможных связей между показателями; неопределенность в выборе стратегии агрегирования – вот основные проблемы, которые должны быть решены при формировании оценочной системы, где основную роль в которой играет выбор метода агрегирования, позволяющей построить обобщенную (интегральную, комплексную) оценку состояния сложного процесса.

Предлагается использовать метод идеального решения TOPSIS (technique for order preference by similarity to an ideal solution - метод наименьшего удаления от оптимального решения), основанного на нечетких числах. В настоящий момент авторами разрабатывается программный комплекс на основе Fuzzy TOPSIS, в котором учитываются индивидуальные экспертных мнения и степени их согласованности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и CNPq(Бразилия), Фонда содействия инновациям(Россия), DBT, DST (Индия), MOST, NSFC(Китай), SAMRC(ЮАР) в рамках научного проекта № 20-51-80002.

Литература:

1. Балута В.И., Осипов В.П., Сивакова Т.В. Технология комплексного моделирования эпидемиологической обстановки // Научный сервис в сети Интернет. – 2020. – № 22. – С. 68-79. – DOI 10.20948/abrau-2020-51.

2. Сивакова Т.В., Судаков В.А., Титов Ю.П. Применение нечетких методов поддержки решения для подбора персонала // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2020. – № 95. – С. 1-15. – DOI 10.20948/prepr-2020-95.

### **Application of the TOPSIS method for modeling the epidemiological situation based on fuzzy judgments**

Sudakov V.A.

MAI, Moscow, Russia

This is not the first time in modern history that the world community has faced a virus pandemic. Resource decisions for dealing with pandemics are often ambiguous and controversial. This is due,

on the one hand, to a lack of resources, which is likely in the event of a rapid spread of infection, and, on the other hand, to the inconsistency and heterogeneity of the criteria for assessing the consequences of decisions made. Therefore, it is urgent to develop methods for multicriteria analysis of alternatives aimed at solving the problems of decision support for the rational use of resources in a fuzzy information environment.

The simulation results are characterized by dozens of criteria, in order to provide an effective assessment of parametric and structural changes, it is necessary to reduce the space of the analyzed criteria; for this, procedures for aggregating criteria and methods for calculating generalized estimates will be created. It is necessary to take into account many different factors characterizing the pandemic, these are both economic (quantitative) and the attitude of the population (qualitative and fuzzy) criteria. Therefore, original combined approaches based on preference domains will be used.

The presence of a significant number of indicators (signs, attributes) characterizing the process; the heterogeneity of the scales in which the assessments are formed; the need to take into account possible links between indicators; uncertainty in the choice of an aggregation strategy - these are the main problems that must be solved in the formation of an evaluation system, where the main role is played by the choice of an aggregation method, which makes it possible to build a generalized (integral, complex) assessment of the state of a complex process.

It is proposed to use the TOPSIS method of ideal solution (technique for order preference by similarity to an ideal solution), based on fuzzy numbers. At the moment, the authors are developing a software package based on Fuzzy TOPSIS, which takes into account individual expert opinions and the degree of their consistency.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR and CNPq, FASIE, DBT, DST, MOST, NSFC, SAMRC according to the research project № 20-51-80002.

References:

1. Baluta V.I., Osipov V.P., Sivakova T.V. The technology of complex modeling of the epidemiological situation // Scientific service on the Internet. - 2020. - No. 22. - S. 68-79. - DOI 10.20948 / abrau-2020-51.

2. Sivakova T.V., Sudakov V.A., Titov Yu.P. Application of fuzzy methods of decision support for personnel selection // Keldysh Institute preprints M.V. Keldysh. - 2020. - No. 95. - S. 1-15. - DOI 10.20948 / prepr-2020-95

### **Об алгоритме дуального управления многомерными безынерционными процессами с запаздыванием в условиях непараметрической неопределенности**

Чжан Е.А.

СФУ, г. Красноярск, Россия

Работа посвящена вопросам синтеза систем управления многомерными безынерционными процессами с запаздыванием, характеристики которых динамически изменяются со временем, но из-за большой величины дискретности контроля, превышающей постоянную объекта, нет возможности получить переходную характеристику процесса [1]. В условиях недостатка априорной информации целесообразно использовать алгоритмы дуального управления, предложенные впервые А.А. Фельдбаумом [2], которые позволяют совмещать две конкурирующие цели: изучение характеристик объекта и достижение цели управления. В ситуации непараметрической неопределенности, когда математическое описание объекта неизвестно, дуальность реализована за счет двух составляющих алгоритма формирования управляющего воздействия. Поисковый шаг отвечает за изучение объекта и включает в себя вычисление невязки выхода объекта и цели управления и непараметрическая оценка обратного оператора, где на основе обучающей выборки вычисляется оценка управляющего воздействия [3, 4]. Особое внимание уделяется качеству исходных данных, т.е. полноте и репрезентативности обучающих выборок. Предлагается алгоритм по анализу данных, позволяющий исключить выбросы и получить новые обучающие выборки, что приведет к повышению точности решения задачи управления.

На практике часто имеет место ситуация, когда задающее воздействие или цель управления представлено в виде нечеткой или интервальной переменной. Предлагается алгоритм по вычислению управляющего воздействия в этом случае. Численное

исследование представленных алгоритмов было проведено при следующих исходных параметрах: уровень шума от 5 до 10%; объем обучающих выборок от 50 до 500 элементов; число выбросов от 1 до 10% выборки. Показана эффективность алгоритма управления.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых ученых МК-763.2020.9.

Литература:

1. Wang X. Time-delay system control based on an integration of active disturbance rejection and modified twice optimal control / X. Wang X., Y. Zhou, Z. Zhao, W. Wei, W. Li // *IEEE Access*, 7, 130734-130744 pp., 2019.

2. Feldbaum A. A. Dual control theory. I. *Avtomatika i Telemekhanika*, 21(9), 1240-1249 pp., 1960.

3. Korneeva A. A., Medvedev A. V., Raskina A. V. About nonparametric dual control algorithm // book: *Systems Analysis: Modeling and Control abstracts of the International conference in memory of Academician Arkady Kryazhimskiy*. 69-71 pp., 2016.

4. Чжан Е.А., Кемпф Д.А. Модификация непараметрического алгоритма моделирования и дуального управления многомерными процессами в условиях неопределенности // *Вестник ВГТУ*. 2020. №3.

### **An algorithm for dual control of multidimensional inertialess processes with delay under nonparametric uncertainty**

Chzhan E.A.

SibFU, Krasnoyarsk, Russia

The work is devoted to the synthesis of control systems for multidimensional inertialess processes with delay, which characteristics dynamically change with time, but due to the large value of the discreteness of control exceeding the constant of the object, it is not possible to obtain the transient characteristic of the process. In conditions of a lack of a priori information, it is advisable to use the dual control algorithms proposed for the first time by A.A. Feldbaum, which allow combining two competing goals: the study of the characteristics of the object and the achievement of the control goal. In a situation of nonparametric uncertainty, when the mathematical description of an object is unknown, duality is realized due to two components of the algorithm for a control action generating. The search step is responsible for studying the object and includes calculating the residual of the object's output and the control goal and a nonparametric estimate of the inverse operator, which is calculated based on the training sample. Particular attention is paid to the quality of the input data, i.e. completeness and representativeness of training samples. An algorithm is proposed for analyzing data, which makes it possible to eliminate outliers and obtain new training samples, which will lead to an increase in the accuracy of solving the control problem.

In practice, a situation often occurs when the setting action or control goal has the form of a fuzzy or interval variable. An algorithm is proposed for calculating the control action in this case. A numerical study of the presented algorithms was carried out with the following initial parameters: noise level from 5 to 10%; training samples size is from 50 to 500 elements; number of outliers from 1 to 10% of the sample size. The efficiency of the control algorithm is shown.

The study was supported by a grant from the President of the Russian Federation for state support of young scientists МК-763.2020.9.

## **Секция №2. «Математическое моделирование физических процессов и явлений»**

### **Section No.2. Mathematical Modelling of Physical Processes and Phenomena**

#### **Расчет стационарных режимов работы бортовых источников питания**

Блинов Ю.И., Блинов К.Ю., Качанов Б.Я., Кошелев П.А.

СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург, Россия

Различают нестационарные и стационарные режимы работы источников питания (ИП). И те, и другие очень важны для понимания их надежной работы. Нестационарные режимы работы определяются в результате численного решения задачи Коши – решения системы дифференциальных уравнений (СДУ), которая описывает процессы в ИП. Стационарный режим может быть получен в результате длительного решения задачи Коши. Однако здесь возникает вопрос – а достигнут ли стационарный режим, с какой точностью достигнут и т.д. Более строгая постановка определения стационарного режима состоит в решении краевой задачи, где сразу же получается весь вектор неизвестных на периоде стационарного режима. Суть решения сводится к следующему: I) дискретизируется СДУ и записывается на каждом шаге интегрирования; II) так повторяется для каждого интервала дискретизации до конца периода; III) записывается система уравнений для последнего шага интегрирования, где новые искомые значения равны значениям неизвестных в начале периода. В результате получается система алгебраических уравнений с блочно-диагональной разреженной структурой и отдельным блоком в верхнем правом углу матрицы. Для решения таких систем разработаны специальные алгоритмы решения.

Такая постановка задачи действительна для линейного случая СДУ, где имеем только RLC-элементы. Если же имеются нелинейные элементы в ИП – диоды и транзисторы, то задача усложняется. При этом возникает вопрос – а какую модель нелинейного элемента применять ключевую или полную. В случае полной модели можно оставить ту же структуру матрицы на шаге дискретизации, но при этом увеличивается сложность вычисления элементов матрицы Якоби системы нелинейных алгебраических уравнений. При использовании ключевой модели вентильных элементов структура Якобиана будет изменяться только на интервалах линейности. В любом случае сложность постановки задачи увеличивается и при учете подачи импульсов управления на транзисторы в заранее неопределенные моменты времени с целью стабилизации выходных параметров ИП – мощность, напряжение, ток.

Литература:

1. Rinzel J., Miller R. Numerical calculation of stable and unstable periodic solution to the Hodgkin-Hukely equations// *Mathematical biosciences*, 1980, № 49, p.27-59.
2. Alan G., Liu J. W-H. *Computer Solution of Large Sparse Positive Definite Systems* – 1981, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J. 07632.-324p.

#### **Calculation of steady-state modes of on-board power supplies**

Blinov Yu.I., Blinov K.Yu., Kachanov B.Ya., Koshelev P.A.

ETU “LETI”, Saint-Petersburg, Russia

There are transient and steady-state operation modes of power supplies (PS). Both are very important for understanding their reliable operation. Transient modes are determined as a result of the numerical solution of the Cauchy problem – the solution of a system of differential equations (SDE), which describes the processes in the PS. The steady-state mode can be obtained as a result of a long-term solution of the Cauchy problem. However, here the question arises – and whether the stationary mode is reached, with what accuracy it is reached, etc. A more exact formulation of the steady-state mode definition consists in solving the boundary value problem, where the entire

vector of unknowns on the steady-state period is immediately obtained. The algorithm of the solution is the following: I) the SDE is wrote at each step of integration; II) it is repeated for each time interval until the end of the period; III) a system of equations is written for the last step of integration, where the new desired values are equal to the values of the irrelevant ones at the beginning of the period. The result is a system of algebraic equations with a block-diagonal sparse structure and a separate block in the upper-right corner of the matrix. Special solution algorithms have been developed to solving such systems.

This description of the problem is valid for the linear case of SDE, where we have only RLC-elements. If there are non-linear elements in the PS – diodes and transistors, then the problem is become more complicated. At the same time, the question arises – which model of the nonlinear element should be used: the valve-model or complete one. In the case of a complete-model, you can leave the same matrix structure at the discretisation step, but the complexity of calculation of the elements of the Jacobi matrix of a system of nonlinear algebraic equations is increased. When using the valve-model of valves elements, the structure of the Jacobian will be change only at intervals of linearity. In any case, the complexity of the problem description is also increased when taking into account the impulses of control system of transistors at pre-view undefined times in order to stabilize the output parameters of the PS – power, voltage, current.

### **Форма небесных вязкоупругих тел в одной математической модели**

Зленко А.А.

МАДИ, г. Москва, Россия

Влияние вязкости на форму вязкоупругих небесных тел – новый и неизученный вопрос. Во-первых, это представляет теоретический интерес, во-вторых, уточняет форму небесных тел и, в-третьих, знание формы тел важно для вычисления их гравитационного потенциала, моментов инерции, моментов сил и всех характеристик движения. Мы исследуем эту проблему на примере движения планеты и ее спутника вокруг притягивающего центра. Масса первого тела (планеты) значительно превосходит массу второго тела (спутника), сумма их масс во много раз меньше массы притягивающего центра. В реальности – это модель системы Земля-Луна-Солнце. Решение этой задачи, ввиду соотношения масс тел, основано на асимптотическом методе теории возмущений с использованием теории малых деформаций и модели Кельвина-Фойхта. В невозмущенном случае тела – шары, движение барицентра тел вокруг притягивающего центра и спутника вокруг планеты является круговым, а тела вращаются вокруг их центров масс с постоянными угловыми скоростями. Возмущающим фактором является вязкоупругость тел и, как следствие, изменение их формы влечет за собой изменение их гравитационного потенциала. Тела начинают двигаться по квазикруговым орбитам, их угловые скорости меняются со временем. Эволюция в движении тел обусловлена именно их вязкостью. Ранее нами были получены перемещения точек тел, планеты и спутника, вызванные вязкоупругой деформацией. В силу линейности теории они представлены в виде суммы двух слагаемых: первое вызвано действием только упругих сил, а второе – диссипативных сил и содержит коэффициент внутреннего вязкого трения. Эти перемещения обратно пропорциональны модулю Юнга и третьей степени расстояния до притягивающего тела (центра). Вязкие перемещения по величине в несколько раз меньше упругих перемещений. Все перемещения даны во вращающейся системе координат, жестко связанной с телом. Мы находим такие системы координат, в которых уравнения поверхностей тел имеют канонический вид. Для упругих перемещений поверхность тела представляет собой эллипсоид вращения, вытянутый вдоль оси симметрии, направленной на притягивающее тело (центр). Для вязких перемещений поверхность тела представляет собой трехосный эллипсоид, его большая полуось образует с направлением на притягивающее тело угол в 45 градусов. При совместном действии этих перемещений поверхностью тела является трехосный эллипсоид, его большая полуось образует с направлением на притягивающее тело (центр) угол, величина которого зависит от коэффициента внутреннего вязкого трения и угловой скорости вращения этого тела, орбитальной угловой скорости притягивающего тела (барицентра). Если обратиться к классической литературе, то там рассматривается несжимаемое тело с единственным параметром – модулем сдвига, поверхность которого аппроксимируется второй зональной

гармоникой. Берется какое-то эмпирическое значение угла запаздывания или он определяется из наблюдений.

Литература:

1. Zlenko A.A. (2020) Displacements of Points of a Viscoelastic Ball Caused by Tides. J. Phys.: Conf. Ser. 1705 012026.
2. Zlenko A.A. (2019) The Perturbing Potential and the Torques in one Three-Body Problem J. Phys.: Conf. Ser. 1301 012022. doi:10.1088/1742-6596/1301/1/012006.
3. Murray C.D., Dermott S.F. (1999) Solar System Dynamics (Cambridge University Press) p 606.
4. Love A E H (1944) A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity 4th ed. (Dover, New York) p 670.

### **The shape of celestial viscoelastic bodies in a mathematical model**

Zlenko A.A.

MADI, Moscow, Russia

The effect of viscosity on the shape of celestial bodies is a new and unexplored question. We investigated this problem by the example of the motion of the planet and its satellite about the center of attraction. The mass of the first body (planet) significantly exceeds the mass of the second body (satellite). The sum of their masses is many times less than the mass of the attracting center. In reality, it is a model of the Earth – Moon – Sun system. The solution of this problem, in view of the ratio of the masses of the bodies, is based on the asymptotic method of perturbation theory using the theory of small deformation and the Kelvin – Voigt model. In the unperturbed motion the bodies are balls, the motion of the barycenter of the bodies about the attracting center and the satellite about the planet is circular, and the bodies rotate around their centers of mass with constant angular velocities. The disturbing reason is the viscoelasticity of the bodies and, as a consequence, a change in their shape entails a change in their gravitational potential. The bodies begin to move in quasi-circular orbits, their angular velocities change with time. Evolution in the motion of the bodies is due precisely to their viscosity. Earlier we obtained displacements of points of bodies, planet and satellite, caused by viscoelastic strains. Due to the linearity of the theory, they are presented as a sum of two terms: the first is caused only by the action of elastic forces, and the second is caused by dissipative forces and contains the coefficient of internal viscous friction. These displacements are inversely proportional to Young's modulus and the third power of the distance to the attracting body (center). Viscous displacements in magnitude are several times less than elastic displacements. All displacements are given in a rotating coordinate frame rigidly connected to the body. We find such coordinate frames in which the equations of the surfaces of the bodies have the canonical form. For elastic displacements, the body surface is an ellipsoid of rotation elongated along the symmetry axis directed to the attracting body (center). For viscous displacements the body surface is a tri-axial ellipsoid, its semi-major axis forms an angle of 45 degrees with the direction to the attracting body (center). Under the combined action of these displacements the body surface is a tri-axial ellipsoid, its semi-major axis forms an angle with the direction to the attracting body (center), the value of which depends on the coefficient of internal viscous friction and of angular velocity of rotation of ellipsoid, orbital angular velocity of the attracting body (barycenter). If we turn to the classical literature, then there is considered an incompressible body with a single parameter – rigidity, the surface of which is approximated by the second zonal harmonic. Some empirical value of lag angle is taken or it is determined from observations.

References:

1. Zlenko A.A. (2020) Displacements of Points of a Viscoelastic Ball Caused by Tides. J. Phys.: Conf. Ser. 1705 012026.
2. Zlenko A.A. (2019) The Perturbing Potential and the Torques in one Three-Body Problem J. Phys.: Conf. Ser. 1301 012022. doi:10.1088/1742-6596/1301/1/012006.
3. Murray C.D., Dermott S.F. (1999) Solar System Dynamics (Cambridge University Press) p 606.
4. Love A E H (1944) A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity 4th ed. (Dover, New York) p 670.

## Математическое моделирование аэродинамического гистерезиса

Алиева Д.А.

ЦАГИ, г. Жуковский, Россия

В работе представлен подход к моделированию гистерезиса аэродинамических характеристик. Статический гистерезис связан с существованием неединственных структур отрывного обтекания и их перестройкой при изменении угла атаки, которая зависит от предыстории движения. В [1] для моделирования нелинейных аэродинамических характеристик был предложен подход с введением дополнительных внутренних переменных, описывающих отрывное обтекание. Их динамическое изменение описывается дополнительным дифференциальным уравнением, правая часть которого содержит статическую зависимость со сдвигом аргумента. Для профиля в качестве такой переменной выбирается положение точки отрыва потока  $x_s(\alpha)$ . Гистерезисные эффекты при этом не учитывались. Для описания статического гистерезиса на профиле в качестве внутренней переменной также может быть выбрано положение точки отрыва на профиле  $x_s$ . Однако, так как теперь зависимость положения этой точки от угла атаки неоднозначна, упомянутый выше подход необходимо модифицировать. Предлагается рассмотреть обратную по отношению к  $x_s(\alpha)$  функцию  $\alpha_s(x)$ . Она однозначна и может быть приближена кусочно-линейной функцией. Для описания динамического положения точки отрыва на профиле можно использовать обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка, включающее характерное время развития отрыва потока  $\tau$ . При малых значениях  $\tau$  уравнение переходит в статическую зависимость. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными для профиля НАСА 0018 [2] показывает качественное и количественное соответствие гистерезиса подъёмной силы  $C_{ya}$  при квазистационарном изменении угла атаки. Моделирование  $C_{ya}$  при гармонических колебаниях с амплитудой  $\Delta\alpha=5^\circ$  и разными частотами также показывает удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными при дополнительном учёте линейного вклада, обусловленного угловой скоростью, пропорционального комплексу вращательной и нестационарной производной. Для исследования влияния гистерезиса в аэродинамических характеристиках на динамику было проведено моделирование произвольного движения системы второго порядка.

Литература:

1. Гоман М.Г. Математическое описание аэродинамических сил и моментов на неустановившихся режимах обтекания с неединственной структурой. / Труды ЦАГИ, вып. 2195, 1983.
2. Жук А.Н., Колинко К.А., Миатов О.Л., Храбров А.Н. Экспериментальные исследования нестационарных аэродинамических характеристик изолированных крыльев в условиях срыва потока. / Препринт ЦАГИ № 86, 1997г., стр. 1-56.

### Mathematical modelling of aerodynamic hysteresis

Alieva D.A.

TsAGI, Zhukovsky, Russia

The paper presents an approach to modeling the hysteresis of aerodynamic characteristics. Static hysteresis is associated with the existence of non-unique separated flow structures and their rearrangement with a change of the angle of attack, which depends on the motion prehistory. In [1], for modeling nonlinear aerodynamic characteristics, an approach was proposed with the introduction of additional internal variables describing the separated flow. Their dynamic change is described by an additional differential equation, the right side of which contains a static dependence with a shift in the argument. For the airfoil, the position of the flow separation point  $x_s(\alpha)$  is chosen as such a variable. Hysteresis effects were not taken into account. To describe the static hysteresis on the airfoil, the flow separation point position can also be selected as an internal variable. However, since the dependence of the position of this point on the angle of attack is now ambiguous, the above approach must be modified. It is proposed to consider the inverse function  $\alpha_s(x)$  with respect to  $x_s(\alpha)$ . It is unambiguous and can be approximated by a piecewise linear function. To describe the dynamic position of the separation point on the airfoil, one can use an ordinary differential equation of the first order, including the characteristic time of the development

of flow separation  $\tau$ . At small values of  $\tau$ , the equation turns into a static dependence. Comparison of the simulation results with experimental data for the NACA 0018 profile [2] shows the qualitative and quantitative correspondence of the lift hysteresis  $C_{ya}$  with a quasisteady change in the angle of attack. Simulation of  $C_{ya}$  for harmonic oscillations with an amplitude of  $\Delta\alpha = 5^\circ$  and different frequencies also shows satisfactory agreement with the experimental data with additional allowance for the linear contribution due to the angular velocity, which is proportional to the complex of the rotational and unsteady derivative. To study the influence of hysteresis in static aerodynamic characteristics on dynamics, the arbitrary motion of a second-order system was simulated.

References:

1. Goman M.G. Mathematical description of aerodynamic forces and moments in unsteady flow regimes with a non-unique structure. / Proceedings of TsAGI, vol. 2195.1983.

2. Zhuk A.N., Kolinko K.A., Miatov O.L., Khrabrov A.N. Experimental studies of unsteady aerodynamic characteristics of isolated wings under flow stall conditions. / TsAGI Preprint No. 86, 1997, pp. 1-56.

### **Метод математического моделирования статического нагружения многослойного пакета из ПКМ с учетом выбора критерия прочности**

<sup>1</sup>Башаров Е.А., <sup>2</sup>Ерков А.П.

<sup>1</sup>МАИ, <sup>2</sup>АО «Гражданские самолёты Сухого», г. Москва, Россия

В работе описано применение математических алгоритмов MS.Excel при разработке расчетной программы прочностного анализа композиционного многослойного пакета. На базе встроенного языка программирования Visual Basic for Applications (VBA) был разработан алгоритм расчета на прочность. Показана применимость средств, встроенных в MS.Excel для автоматизации процесса расчета изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) слоистой структуры. Произведено обоснование выбора критериев прочности в зависимости от типов укладок материалов и конструкций. Проанализированы границы применимости критериев прочности для различных типов ПКМ. Разработка методов автоматизации расчета на прочность композиционных материалов является в настоящее время чрезвычайно важной составляющей процесса широкомасштабного и эффективного их внедрения в конструкцию летательного аппарата. Решение данного вопроса позволяет повысить качество и конкурентоспособность продукции, поскольку при автоматизации расчета существенно уменьшается время расчета на прочность, и как следствие, повышается эффективность работы инженера. Метод конечных элементов в свое время произвел переворот в области решения задач прочности летательных аппаратов, но его применение требует больших затрат времени, чем применение аналитических решений реализованных в виде программных комплексов узкой направленности. Выводы: 1) Разработана программа автоматизированного расчета на прочность слоистого композиционного материала под действием 6 силовых факторов. Программа значительно увеличивает производительность инженера занимающегося проектированием/расчетом слоистых композитных конструкций; 2) Точность расчета зависит от выбранного критерия и симметричности пакета. При высокой несимметричности ошибка расчета увеличивается, что связано с особенностями теории слоистых пластин; 3) Приведено краткое описание реализованных в программе критериев прочности с краткими рекомендациями по применению. Литература:

1. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.

2. Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. Композиционные материалы. Справочник. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.

3. Дудченко А.А. Прочность и проектирование элементов авиационных конструкций из ПКМ. – М.: Изд-во МАИ, 2007.– 200 с.

4. Abrate, S. (2008). Criteria for yielding or failure of cellular materials, Journal of Sandwich Structures and Materials, vol. 10, pp. 5–51.

5. Daniel L.M., Ishai O. Engineering Mechanics of Composite Materials, Oxford University Press, 1994.

6. Department of Defense Handbook, Polymer Matrix Composites. MIL-HDBK-17E, 1997.
7. Isaac M. Daniel, Ori Ishai Engineering Mechanics of Composite Materials, OXFORD UNIVERSITY PRESS, 1994
8. Laszlo P. Kollar Mechanics of Composite Structure, Cambridge, 2003.
9. Gdoutos, E.E., Daniel, I.M. and Wang, K.A. (2001). Multiaxial characterization and modeling of a PVC cellular foam. Journal of Thermoplastic Composite Materials, vol. 14, pp. 365–373.
10. Gol'denblat, I., Kopnov, V. A. (1966). Strength of glass reinforced plastic in the complex stress state. Polymer Mechanics, vol. 1, pp. 54–60. (Russian: Mechanika Polimerov, vol. 1, pp. 70–78. 1965).
11. Jones R.M. Mechanics of Composite Materials. New York: McGraw-Hill, 1975.
12. Hussein R.M. Composite Panel/Plates. Technomic Publishing Company, 1986.

**Method of mathematical modeling of static loading of a multilayer package made of PCM, taking into account the choice of the strength criterion**

<sup>1</sup>Basharov E.A., <sup>2</sup>Erkov A.P.

<sup>1</sup>MAI, <sup>2</sup>Sukhoi Civil Aircraft JSC, Moscow, Russia

The paper describes the use mathematical algorithms of MS.Excel in the development of the calculation program strength analysis composite multilayer package. On the basis of the built-in programming language Visual Basic for Applications (VBA) was developed algorithm for calculating the strength. Shown the applicability of the tools embedded in MS.Excel for automation of process of calculation of products from polymeric composite materials (PCM) layered structure. Produced justification of the choice of strength criteria depending on the types of styles materials and designs. Analyzes the limits of applicability of strength criteria for different types of PCM. The development of methods for automating the calculation of the strength of composite materials is currently an extremely important component of the process of large-scale and effective implementation of them in the design of an aircraft. The solution of this issue makes it possible to improve the quality and competitiveness of products, since the calculation automation significantly reduces the calculation time for strength, and as a result, the efficiency of the engineer's work increases. The finite element method at one time made a revolution in the field of solving problems of the strength of aircraft, but its application requires more time than the use of analytical solutions implemented in the form of software complexes of a narrow orientation. Conclusions: 1) A program for automated calculation of the strength of a layered composite material under the influence of 6 force factors has been developed. The program significantly increases the productivity of an engineer engaged in the design/calculation of layered composite structures; 2) The accuracy of the calculation depends on the selected criterion and the symmetry of the package. With high asymmetry, the calculation error increases, which is due to the peculiarities of the theory of layered plates; 3) A brief description of the strength criteria implemented in the program with brief recommendations for use is given.

**Методика моделирования устройств ракетного вооружения на примере перспективного адаптивного авиационного катапультного устройства**

Беклемищев Ф.С.

МАИ, г. Москва, Россия

При проектировании и разработке сложных технических систем, к которым относятся и устройства ракетного вооружения (УРВ), широко применяются инструменты математического моделирования. Интенсивное развитие информационных технологий способствует повсеместному использованию методологии математического моделирования.

Существующие подходы к разработке математических моделей сложных технических систем подразумевают использование высокопроизводительных вычислительных средств. Прямой натурный эксперимент связан с большими материальными и временными затратами. Для систем, характеризующихся быстродействием и сложностью физических процессов, зависящих от большого числа факторов, единственным методом исследования является использование метода имитационного моделирования [1].

При создании перспективных УРВ необходимо решать комплекс сложных конструкторских задач, в том числе задач моделирования работы таких систем в условиях

боевого применения. Решение этих задач выполняется для обоснования рациональных характеристик и параметров систем, а также для снижения стоимости разработки и производства.

Сложность и многообразие условий боевого применения не позволяют описать режимы функционирования УРВ одной универсальной моделью, отвечающей требованиям достоверности и оперативности [2].

В данной работе рассматривается методика моделирования УРВ на примере перспективного адаптивного авиационного катапультного устройства (ААКУ). Логика работы методики определяется взаимодействием трёх блоков.

В блоке №1 формируются твердотельные CAD-модели УРВ и авиационных средств поражения (АСП), построенные в программе SolidWorks. Данные модели содержат в себе информацию об инерционно-массовых характеристиках УРВ и АСП, а также элементы «справочной геометрии», предназначенные для дальнейшего определения шарниров (сопряжений) между элементами системы в блоке №2.

В блоке №2 создаются динамические модели перспективной ААКУ и АСП, а также модели их комплектации, на основе CAD-моделей из блока №1. Модель комплектации является моделью верхнего уровня в структуре модель данного блока и принимает из блока №3 значения управляющих воздействий (давления, силы на штоках цилиндров двухканальной системы). В качестве дополнительных моделей в данном блоке могут быть использованы модели атмосферы, измерения параметров, аэродинамики.

В блоке №3 в системе SimInTech формируется математическая модель исполнительской части перспективной ААКУ. Данная модель описывает процессы, протекающие в гидравлических узлах двух канал системы, а также формирует управляющие сигналы для системы управления УРВ, позволяющие обеспечить желаемые и безопасные параметры катапультирования от начала движения и до отделения АСП.

В результате применения предлагаемой методики были определены параметры исполнительской части перспективного ААКУ, а также подтверждена работоспособность алгоритмов системы управления катапультированием. Полученные результаты моделирования были верифицированы с результатами отработки на экспериментальном стенде и показали хорошую сходимость.

Литература:

1. Имитационное моделирование боевых действий: теория и практика / Под ред. П.А. Созинова П.А., И.Н. Глушкова - Тверь, 2013. - 528 с.
2. Андреев Г.И., Созинов П.А., Тихомиров В.А. Основы теории принятия решений / Под ред. П.А. Созинова. - М.: Радиотехника, 2017 - 648 с.

### **A technique for modeling rocket armament systems on the example of a promising adaptive aviation catapult system**

Beklemishchev F.S.  
MAI, Moscow, Russia

In the design and development of complex technical systems, which include rocket armament systems (RAS), mathematical modeling tools are widely used. The intensive development of information technologies contributes to the widespread use of the methodology of mathematical modeling.

The existing approaches to the development of mathematical models of complex technical systems imply the use of high-performance computing facilities. A direct field experiment is associated with large material and time costs. For systems characterized by the speed and complexity of physical processes that depend on a large number of factors, the only research approach is to use the simulation method.

When creating promising RAS, it is necessary to solve a complex of complex design tasks, including the tasks of modeling the operation of such systems in conditions of combat use. The solution of these problems is carried out to justify the rational characteristics and parameters of systems, as well as to reduce the cost of development and production.

The complexity and variety of conditions for combat use do not allow describing the modes of operation of RAS with a single universal model that meets the requirements of reliability and efficiency.

This paper discusses the methodology for modeling the RAS using the example of a promising adaptive aircraft catapult system (AACCS). The logic of the methodology is determined by the interaction of three blocks.

In block 1, solid-state CAD models of RAS and airborne weapons (AW) devices are generated, built in the SolidWorks software. These models contain information about the inertial-mass characteristics of the RAS and AW, as well as elements of the "reference geometry" intended for further definition of the hinges (mates) between the system elements in block 2.

In block 2, dynamic models of promising AACCS and AW are created, as well as models of their configuration, based on CAD-models from block 1. The configuration model is the top-level model in the structure of the model of this block and takes from block 3 the values of control actions (pressure, forces on the cylinder rods of the two-channel system). As additional models in this block, models of the atmosphere, measurements of parameters, and aerodynamics can be used.

In block 3 in the SimInTech system, a mathematical model of the executive part of the promising AACCS is being formed. This model describes the processes occurring in the hydraulic units of the two channels of the system, and also generates control signals for the control system of the RAS, allowing to provide the desired and safe parameters of ejection from the start of movement to the separation of the AW.

As a result of the application of the proposed technique, the parameters of the executive part of the promising AACCS were determined, and the efficiency of the algorithms of the ejection control system was confirmed. The obtained simulation results were verified with the results of testing on the experimental bench and showed good convergence.

#### **Многопараметрическое численное моделирование течений плазмы в мощном индукционном ВЧ-плазмотроне ВГУ-3 ИПМех РАН**

Васильевский С.А., Брызгалов А.И., Колесников А.Ф., Якуш С.Е.  
ИПМех РАН, г. Москва, Россия

Проведено многопараметрическое исследование зависимости течений воздушной плазмы в разрядном канале ВЧ-плазмотрона ВГУ-3 мощностью 1 МВт от основных параметров режимов его работы – давления  $P$  и мощности по анодному питанию  $N_{ap}$ . Расчеты течения в разрядном канале ВГУ-3 проводились по модифицированной программе Alpha на основе численного решения уравнений Навье-Стокса. Источниковые члены, входящие в уравнения и выражающие действие силы Лоренца и Джоулево тепловыделение, вычисляются через комплексную амплитуду усредненного электрического поля, точнее через ее тангенциальную компоненту  $E_{\theta}$  [1]. Вихревое электромагнитное поле, порожденное высокочастотным током в витках индуктора (частота тока  $f=0.44$  МГц) и вихревыми токами в плазме, описывается двумерными уравнениями Максвелла для  $E_{\theta}$  [2]. Граничные условия для этих уравнений – равенство  $E_{\theta}$  нулю на бесконечности, практически – на достаточно большом удалении от индуктора по  $z$  и  $r$ . Решение этих уравнений проводится на дополнительной разностной сетке, выходящей за пределы области течения плазмы, и требует большого дополнительного времени расчета. В результате проведенных расчетов для  $P=50, 100, 200, 300$  мбар и  $N_{ap}=50, 100, 200, 300$  кВт получены изолинии функции тока и изотермы в разрядном канале, их зависимости от  $P$  и  $N_{ap}$ . Получены также зависимости радиальных профилей скорости  $U_c$  и энтальпии  $h_c$  на срезе канала от  $P$  и  $N_{ap}$ . Энтальпия зависит от мощности  $N_{ap}$  и давления  $P$  довольно просто:  $h_c(r)$  при фиксированном  $r$  увеличивается с ростом  $N_{ap}$  и уменьшается с ростом  $P$  (кроме случая  $N_{ap}=50$  кВт), причем зависимость от давления слабая при малой мощности и значительная при большой мощности (300 кВт). Зависимость скорости на оси струи  $U_{c0}$  от  $N_{ap}$  и  $P$  имеет обычный характер:  $U_{c0}$  больше для большей мощности, меньше для большего давления. Зависимость от радиуса  $U_c(r)$  для больших мощностей (300 и 200 кВт) имеет обычный монотонный характер. Для малой мощности 50 кВт зависимость  $U_c(r)$  становится немонотонной, т.е. скорость достаточно мала на оси струи, затем растет при удалении от оси и уменьшается до

нуля только вблизи стенки канала. Для мощности 100 кВт скорость  $U_c$  почти постоянная в ядре струи и уменьшается до нуля только вблизи стенки.

Литература:

1. Васильевский С.А., Колесников А.Ф. Численное моделирование течений равновесной индукционной плазмы в цилиндрическом канале плазматрона // Изв. РАН. МЖГ. 2000. №5. С. 164-173.
2. Vasilevskii S.A., Kolesnikov A.F., Bryzgalov A.I., Yakush S.E. Computation of inductively coupled air plasma flow in the torches // J. Phys.: Conf. Series. 2018. V.1009. P. 012027.

### **Multiparameter CFD simulation of plasma flows in a powerful HF induction plasmatron VGU-3 IPMech RAS**

Vasilievskii S.A., Bryzgalov A.I., Kolesnikov A.F., Yakush S.E.  
IPMech RAS, Moscow, Russia

A multiparameter study of the dependence of air plasma flows in the discharge channel of VGU-3 HF plasmatron with a power of 1 MW on the main parameters of its operation modes – pressure  $P$  and anode supply power  $N_{ap}$  – was carried out. The calculations of the flow in the VSU-3 discharge channel were carried out using the modified Alpha program based on the numerical solution of the Navier-Stokes equations. The source terms included in the equations and expressing the action of the Lorentz force and Joule heat release are calculated through the complex amplitude of the averaged electric field, more precisely through its tangential component  $E_{\theta}$  [1]. The vortical electromagnetic field generated by the high-frequency current in the turns of the inductor (current frequency  $f = 0.44$  MHz) and vortical currents in the plasma is described by the two-dimensional Maxwell equations for  $E_{\theta}$  [2]. Boundary conditions for these equations are the equality of  $E_{\theta}$  to zero at infinity, in practice, at a sufficiently large distance from the inductor in  $z$  and  $r$ . Solution of these equations is carried out on an additional finite difference grid that goes beyond the plasma flow region and requires a large additional computation time. As a result of the calculations performed for  $P = 50, 100, 200, 300$  mbar and  $N_{ap} = 50, 100, 200, 300$  kW, isolines of the stream function and isotherms in the discharge channel, their dependences on  $P$  and  $N_{ap}$ , were obtained. The dependences of the radial profiles of the velocity  $U_c$  and enthalpy  $h_c$  at the channel exit section on  $P$  and  $N_{ap}$  were also obtained. The enthalpy depends on the power  $N_{ap}$  and pressure  $P$  quite simply:  $h_c(r)$  for a fixed  $r$  increases with increasing  $N_{ap}$  and decreases with increasing  $P$  (except for the case  $N_{ap} = 50$  kW), and the dependence on pressure is weak at low power and significant at high power (300 kW). The dependence of velocity at the jet axis  $U_{c0}$  on  $N_{ap}$  and  $P$  has a usual character:  $U_{c0}$  is larger for higher power, less for higher pressure. The dependence on the radius  $U_c(r)$  for high powers (300 and 200 kW) has the usual monotonic character. For a low power of 50 kW, the dependence  $U_c(r)$  becomes nonmonotonic, i.e. the velocity is rather small on the jet axis, then increases with distance from the axis and decreases to zero only near the channel wall. For a power of 100 kW, the velocity  $U_c$  is almost constant in the jet core and decreases to zero only near the wall.

References:

1. Vasilevskii S.A., Kolesnikov A.F. Numerical simulation of equilibrium induction plasma flows in a cylindrical plasmatron channel // Fluid dynamics. 2000. Vol.35. No.5. P. 769–777.
2. Vasilevskii S.A., Kolesnikov A.F., Bryzgalov A.I., Yakush S.E. Computation of inductively coupled air plasma flow in the torches // J. Phys.: Conf. Series. 2018. V.1009. P. 012027.

### **Моделирование теплового процесса периодического высокотемпературного нанесения функционального покрытия**

Гарибян Б.А., Формалев В.Ф., Дегтяренко Р.А.  
МАИ, г. Москва, Россия

Процессы тепломассопереноса в областях подверженных фазовым превращениям встречаются в разных областях техники: технологических производствах, машиностроении [1], а также при эксплуатации летательных аппаратов в условиях высокоскоростного атмосферного полета [2, 3]. Во многих задачах с подвижными границами, на которых происходят фазовые превращения, сама граница движется вглубь тела, а ее координаты устанавливаются относительно известных первоначальных границ [4, 5]. Ситуация меняется,

когда объем тела увеличивается нанесением высокотемпературной фазы, то есть когда граница движется наружу относительно первоначального тела [1]. В этом случае фазовые превращения сопровождаются выделением тепловой энергии за счет конденсации и теплопроводности присоединенной фазы, а также лучистого теплообмена.

В работе поставлена задача теплопереноса при периодическом нанесении на плоскую подложку газообразной фазы высокой температуры, где в каждом временном периоде сначала происходит кратковременное напыление фазы, а затем длительное кондуктивно-конвективное и лучистое охлаждение тела. Подобные тепловые процессы газотермического напыления имеют место при формировании функциональных покрытий, в том числе теплозащит гиперзвуковых летательных аппаратов.

Для решения задачи проведена линеаризация лучистой составляющей переноса с помощью равновесной температуры, полученной как точное решение уравнения 4-й степени, следующего из граничного условия [2]. С помощью специальной замены пространственной координаты, позволившей перейти к области с фиксированными границами и применения интегрального преобразования Фурье [1, 2], получено аналитическое решение задачи. Проведено компьютерное моделирование теплового состояния подложки с циклически нестационарной подвижной границей – увеличивающейся толщиной подложки. По расчетным данным приближенным к реальным, в каждом цикле нагрев температурой 3000К и продолжительностью 0.2с сменялся снятием нагрева и естественным охлаждением с температурой окружающей среды 300К, длившимся 1.2с, а общее количество циклов составляло от единиц до нескольких десятков. Исследование теплопереноса проводилось в разных точках подложки, в том числе в крайней точке подвижной границы, и показало его существенно нестационарный характер с пиковыми максимумами и минимумами температур на границе, наличием инерционных колебаний температуры во внутренних точках. Численная реализация аналитического решения задачи, анализ, верификация и обсуждение результатов моделирования показали адекватность предложенной в работе физико-математической модели и метода решения.

Литература:

1. Карташов Э.М., Кудинов В.А. Аналитические методы теории теплопроводности и ее приложений. – М.: ЛЕНАНД, 2018.
2. Формалев В.Ф., Колесник С.А. Математическое моделирование сопряженного теплопереноса между вязкими газодинамическими течениями и анизотропными телами. – М.: ЛЕНАНД, 2019.
3. Зинченко В.Н., Гольдин В.Л., Зверев В.Г. Исследование влияния выбора материалов пассивной тепловой защиты на характеристики сопряженного тепломассообмена при пространственном обтекании затупленных тел. Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56. № 6. С.815.
4. Формалев В.Ф. Моделирование тепломассопереноса в теплозащитных композиционных материалах на основе универсального закона разложения связующих. Теплофизика высоких температур. 2020. Т. 58. №3. С.412–418.
5. Карташов Э.М. Аналитические методы решения краевых задач в областях с движущимися границами. Изв. РАН. Энергетика. 1999. №5. С.3.

### **Simulation of the thermal process of periodic high-temperature deposition of a functional coating**

Garibyan B.A., Formalev V.F., Degtyarenko R.A.  
MAI, Moscow, Russia

Heat and mass transfer processes in areas subject to phase transformations are found in various fields of technology: technological production, mechanical engineering, as well as during the operation of aircraft in high-speed atmospheric flight. In many problems with moving boundaries, on which phase transformations occur, the boundary itself moves deep into the body, and its coordinates are established relative to the known initial boundaries. The situation changes when the volume of the body is increased by the application of the high-temperature phase, that is, when the boundary moves outward relative to the original body. In this case, phase transformations are

accompanied by the release of thermal energy due to condensation and thermal conductivity of the attached phase, as well as radiant heat transfer.

The paper posed the problem of heat transfer during periodic deposition of a gaseous phase of high temperature (hot aerosol) on a flat substrate, where in each time period, first there is a short-term deposition of the phase, and then a long-term conductive-convective and radiant cooling of the body. Similar thermal processes of thermal spraying take place during the formation of functional coatings, including thermal protection of hypersonic aircraft.

To solve the problem, the radiative transfer component was linearized using the equilibrium temperature, obtained as an exact solution to the 4th degree equation following from the boundary condition. With the help of a special replacement of the spatial coordinate, which made it possible to pass to a region with fixed boundaries and the use of the integral Fourier transform, an analytical solution of the problem was obtained. Computer simulation of the thermal state of a substrate with a cyclically unsteady moving boundary – an increasing substrate thickness has been carried out. According to the calculated data close to real, in each cycle, heating with a temperature of 3000 K and a duration of 0.2 sec was replaced by the removal of heating and natural cooling with an ambient temperature of 300 K, which lasted 1.2 sec, and the total number of cycles ranged from a few to several tens. The study of heat transfer was carried out at different points of the substrate, including at the extreme point of the moving boundary, and showed its essentially unsteady character with peak maximums and minimums of temperatures at the boundary, the presence of inertial temperature fluctuations at internal points. The numerical implementation of the analytical solution of the problem, analysis, verification and discussion of the simulation results showed the adequacy of the physical and mathematical model and solution method proposed in the work.

#### **Математическое моделирование технологического процесса научно-исследовательских испытаний газогенератора двухконтурного турбореактивного двигателя в условиях моторостроительного предприятия**

Грибков И.Н.

АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь, Россия

Технологический процесс научно-исследовательских испытаний газогенератора двухконтурного турбореактивного двигателя в условиях моторостроительного предприятия, предложенный в [3] представляет собой сложные и трудоемкие операции. Поэтому обеспечение высокого уровня требований к качеству и надежности, и необходимость значительного сокращения трудоемкости и стоимости испытательных работ невозможно без использования математического моделирования [2].

Математическая модель рассматриваемого процесса, представляет собой многоуровневую иерархическую структуру, состоящую из функциональных модулей отражающих функциональную структуру процесса, которые в свою очередь представляют собой взаимосвязанные совокупности базовых модулей, построенные по принципу достаточно точного описания происходящих в них физических процессов. Описание базового модуля основывается на его представлении, как о некотором физическом объеме с входом, выходом и расходной характеристикой входа с одномерным течением рабочего тела. В этом случае поток рабочего тела в расчетном сечении полностью определяется тремя термодинамическими параметрами: давлением, температурой, и скоростью или, при известной площади проходного сечения, расходом рабочего тела. Связь между параметрами на входе и выходе описывается в виде уравнений сохранения массы и энергии, а в случае наличия механической энергии дополняется уравнением движения.

Функциональный модуль активных элементов процесса описывает изменение параметров рабочего процесса на установившихся и неустойчивых режимах работы, как газогенератора двухконтурного турбореактивного двигателя, так и технологического двухконтурного турбореактивного двигателя, где исходными данными, в значительной степени определяющими точность полученных модулей являются геометрические размеры проточной части, газодинамические характеристики узлов, характеристики топлива [1].

Функциональный модуль пассивных элементов процесса описывает изменение параметров рабочего процесса в системе подвода рабочего тела на установившихся и неустойчивых режимах работы активных элементов. Рассматриваемый модуль может быть представлен

пневматической емкостью, заполненной рабочим телом, движущимся под действием перепада давлений, создаваемого работой активных элементов процесса [2].

Доказана адекватность полученной математической модели реальному технологическому процессу на основании сопоставления расчетных и экспериментальных данных, при этом максимальная ошибка не превышает 2 %. Таким образом, математическая модель предоставляет возможность для детального изучения особенностей функционирования технологического процесса испытаний.

Литература:

1. Добрянский, Г. В. Динамика авиационных ГТД / Г.В. Добрянский, Т.С. Мартынова. – М. : Машиностроение, 1989. – 240 с.

2. Лебсак, В. А. Математическая модель переходных процессов в компрессорных аэродинамических трубах / В. А. Лебсак, О. В. Лыжин // Ученые записки ЦАГИ. – 1985. – Т. 16, № 2. – С. 33-39.

3. Пат. 2622588 Российская Федерация, МПК G 01 M 15/14. Стенд для испытания газогенераторов турбореактивных двухконтурных двигателей / Иноземцев А. А., Галлямов М. Д., Двинских А. В., Грибков И. Н., Полулях А. И. ; заявитель и патентообладатель акционерное общество «ОДК-Авиадвигатель». – № 2016122365 ; заявл. 06.06.2016 ; опубл. 16.06.2017, Бюл. № 17. – 7 с.

### **Mathematical simulation of the technological process of research tests of the bypass turbojet engine core in the conditions of the engine OEM's facility**

Gribkov I.N.

JSC "UEC-Aviadvigatel", Perm, Russia

The technological process of research tests of the bypass turbojet engine core in the conditions of the engine OEM facility, proposed in [3], involves complex and time-consuming operations. Therefore, it is impossible to ensure a high level of quality and reliability requirements and the necessary significant reduction of manpower and cost of testing work without using mathematical simulation [2].

The mathematical model of the process under consideration is a multi-level hierarchical structure consisting of functional modules reflecting the functional structure of the process, which in turn are interconnected sets of basic modules built on the principle of a fairly accurate description of the physical processes occurring in them. The description of the basic module is based on its representation as a certain physical volume with an input, output and flow characteristics of the inlet with a one-dimensional flow of the working fluid. In this case, the flow of the working fluid in the design section is completely determined by three thermodynamic parameters: pressure, temperature, and velocity, or, for a known area of the flow section, the flow rate of the working fluid. The relationship between the input and output parameters is described in the form of equations of conservation of mass and energy, and in case of mechanical energy, it is supplemented by the equation of motion.

The functional module of the active elements of the process describes the change in the parameters of the working process at steady-state and transient operating modes, both of the bypass turbojet engine core and of a technological bypass turbojet engine, where the initial data that largely determines the accuracy of the resultant modules are the geometric dimensions of the flowpath, gas dynamic characteristics of modules, fuel characteristics [1].

The functional module of passive process elements describes the change in the parameters of the working process in the working fluid supply system at steady-state and transient operating modes of active elements. The module under consideration can be represented by a pneumatic container filled with a working fluid moving under the influence of a pressure drop created by the operation of the active elements of the process [2].

The adequacy of the resultant mathematical model to the real technological process is proved on the basis of a comparison of design and experimental data, while the maximum error does not exceed 2 %. Thus, the mathematical model provides an opportunity for a detailed study of the specific features of functioning of the technological testing process.

References:

1. Dobryansky, G. V. Dynamics of aviation gas turbine engines / G. V. Dobryansky, T. S. Martyanova. - M.: Mashinostroenie, 1989. - 240 p.
2. Lebsak, V. A. Mathematical model of transient processes in compressor wind tunnels / V. A. Lebsak, O. V. Lyzhin // Scientific notes of TsAGI. - 1985. - Vol. 16, No. 2. - pp. 33-39.
3. Pat. 2622588 Russian Federation, IPC G 01 M 15/14. Stand. for testing gas generators of turbojet two-circuit engines / Inozemtsev A. A., Gallyamov M. D., Dvinskii A.V., Gribkov I. N., Polulah A. I.; applicant and patent JSC "UEC-Aviadvigatel". - No. 2016122365; application 06.06.2016; Publ. 16.06.2017, Byul. no. 17 – 7 p.

### **Моделирование процесса индивидуального подбора деталей при сборке**

Задорина Н.А., Непомилуев В.В.

РГАТУ имени П.А. Соловьева, г. Рыбинск, Россия

Заключительным этапом процесса изготовления изделия является процесс сборки, который в значительной степени определяет параметры качества изделия. Основной показатель качества сборки изделия – точность, оцениваемая величиной погрешности размера замыкающего звена.

Известно [1], что при использовании традиционных методов сборки процесс суммирования погрешностей деталей неуправляем и требуемое качество обеспечивается на основе постпроцессного контроля. Метод индивидуального подбора деталей позволяет управлять этим процессом путем предварительного компьютерного моделирования различных вариантов формируемой размерной цепи и выбора лучшего из них.

Как показывают результаты исследования, погрешность размера замыкающего звена может быть снижена в 10-15 раз без повышения требований к качеству деталей, причем, в отличие от других методов, эта погрешность уменьшается при увеличении количества составляющих звеньев.

Одной из основных проблем при осуществлении этого метода является поиск наилучших вариантов сочетания деталей, поскольку даже для небольших запасов собираемых деталей возможно астрономическое количество вариантов, которые необходимо рассмотреть.

Задачу индивидуального подбора можно трактовать, как задачу комбинаторной оптимизации. Если изделие состоит из нескольких деталей различного вида, вектора (изделия), сформированные из истинных размеров деталей, образуют конечные мультимножества [2]. Необходимо найти такую комбинацию векторов, чтобы некоторый заданный функционал качества на данной совокупности достигал экстремума.

В [3] для имитации сборки с использованием индивидуального подбора деталей предложен алгоритм частичного случайного перебора, в основу которого положены генетические алгоритмы, которые не дают точного алгоритма решения задачи, а определяют только общую схему. Поэтому для решения конкретной задачи необходимо адаптировать алгоритм с учетом всех особенностей предметной области. Так, в классическом варианте с помощью генетического алгоритма осуществляется поиск «лучшей» особи, в случае подбора деталей необходимо найти «лучшую» популяцию особей или популяцию «лучших» особей. Каждая особь – это вариант сборочного комплекта, ген – деталь. Начальная популяция представляет собой допустимое решение задачи, которое будет улучшаться на каждом шаге алгоритма. Отбор особей для скрещивания может проводиться любым способом. Мутации в силу ограничений предметной области не выполняются. Для создания нового поколения применяется принцип элитарности.

Использование такого подхода позволяет подобрать собираемые детали перед сборкой таким образом, чтобы они в максимально возможной степени компенсировали погрешности изготовления друг друга.

Литература:

1. Безязычный, В.Ф., Непомилуев В.В., Семенов А.Н. Обеспечение качества изделий при сборке. М.: Издательский дом «Спектр», 2012. - 204 с.
2. Грэхем Р., Кнут Д., Паташник О. Конкретная математика. Основание информатики: Пер. с англ. – М.: Мир, 1998. – 703 с.
3. Задорина Н.А. Разработка модели процесса индивидуального подбора деталей с использованием методов стохастической оптимизации // Сб. научных трудов 5-й

### **Modeling of the process of parts individual selection during assembly**

Zadorina N.A., Nepomiluyev V.V.

P.A. Solovyov RSATU, Rybinsk, Russia

The final stage of the product manufacturing process is the assembly process, which largely determines the quality parameters of the product. The main indicator of the product assembly quality is accuracy, estimated by the size error of the closing link.

It is known [1] that when using traditional assembly methods, the process of summing up the errors of parts is uncontrollable and the required quality is provided on the basis of post-process control. The method of individual selection of parts allows you to control this process by preliminary computer modeling of various variants of the formed dimensional chain and choosing the best of them.

As the results of the study show, the error in the size of the closing link can be reduced by 10-15 times without increasing the requirements for the quality of parts, and, unlike other methods, this error decreases with an increase in the number of constituent links.

One of the main problems when implementing this method is to find the best options for combining parts, since even for small stocks of assembled parts, an astronomical number of options that need to be considered is possible.

The problem of individual selection can be interpreted as a combinatorial optimization problem. If the product consists of several parts of different types, the vectors (products) formed from the true dimensions of the parts form finite multisets [2]. It is necessary to find such a combination of vectors that some given quality functional on a given set reaches an extremum.

In [3], to simulate an assembly using individual selection of parts, a partial random search algorithm is proposed, which is based on genetic algorithms that do not give an exact algorithm for solving the problem, but only determine the general scheme. Therefore, to solve a specific problem, it is necessary to adapt the algorithm taking into account all the features of the subject area. So, in the classical version, a search for the "best" individual is carried out using a genetic algorithm, in the case of selecting details, it is necessary to find the "best" population of individuals or a population of "best" individuals. Each individual is a variant of the assembly kit, a gene is a part. The initial population is a valid solution to the problem, which will improve at each step of the algorithm. The selection of individuals for crossing can be carried out in any way. Mutations due to the limitations of the subject area are not performed. To create a new generation, the principle of elitism is applied.

Using this approach allows you to select the assembled parts before assembly in such a way that they compensate for each other's manufacturing errors to the maximum extent possible.

#### References:

1. Bezylazny, V. F., Nepomiluyev V. V., Semenov A. N. Ensuring the quality of products during assembly. Moscow: Publishing house "Spectrum", 2012. - 204 p.
2. Graham R., Knut D., Patashnik O. Concrete mathematics. The foundation of computer Science: Trans. from English-M.: Mir, 1998. - 703 p.
3. Zadorina N. A. Development of a model of the process of individual selection of parts using stochastic optimization methods // Collection of scientific papers of the 5th International Youth Scientific and practical conference PRODUCT QUALITY: CONTROL, MANAGEMENT, IMPROVEMENT, PLANNING. Vol. 1, Yugo-Zapad State University, Kursk: Publishing house of CJSC "University Book", 2018. pp. 213-217.

## **Верификация математических моделей с помощью экспериментального модального анализа и их использование для оценки изменения технического состояния роторов газотурбинных двигателей**

Зубко А.И., Звонарев С.Л., Зубко А.А.

МАИ, г. Москва, Россия

Определение собственных частот колебаний элементов конструкции необходимо для выработки мероприятий с целью исключения или снижения резонансных явлений в рабочем диапазоне частот вращения изделия. Процесс анализа характеристики ротора начинается с создания его математической модели и проведения с ее помощью аналитического модального анализа, результатом которого является получение расчетным путем собственных частот и форм колебаний.

При построении математической модели и проведении расчетов, как правило, принимается, что все динамические процессы имеют линейную зависимость. На самом деле это не всегда так. Для решения большинства практических задач свойствами нелинейности можно пренебречь и результат будет иметь несущественную погрешность. Но также существуют задачи не учет нелинейности, в решении которых, может приводить к заметному искажению получаемых результатов. Именно ко второму классу в большинстве случаев относятся задачи модального анализа роторных систем газотурбинных двигателей (ГТД).

Для проведения анализа с целью определения технического состояния ГТД диагностическими признаками развивающегося дефекта или повреждения могут являться небольшие отклонения в работе системы. При не учете их влияния на систему проведение всех других работ может оказаться бесполезным. В результате увеличения точности расчетов, повышающих чувствительность математической модели, растет и число возможных неверных решений из-за некорректного выбора начальных условий или не совсем полного учета влияния существенных воздействующих факторов, что вносит значительную погрешность. Поэтому после создания модели необходима ее верификация. В ряде случаев, для этой цели используется экспериментальный модальный анализ. В себе он сочетает экспериментальный и расчетный подход, основанный на оценке передаточных функций между точками входа (воздействия модального молотка) и выхода (датчика вибрации).

Наличие резонансных процессов ГТД в рабочем диапазоне частот не допустимы, поэтому, как правило, в процессе разработки двигателей выполняется их отстройка в диапазон частот, находящийся выше или ниже рабочего. Это приводит к их возможному проявлению при увеличении частоты вращения ротора от нуля до малого газа в процессе запуска. Изменение технического состояния также может привести к возникновению резонансных процессов отдельных деталей роторов. Таким образом, при периодическом контроле, по результатам снятия амплитудно-частотной характеристики ГТД в процессе его работы можно отслеживать изменение значений частот отдельных резонансных процессов и увязывая полученные значения с изменением жесткости и демпфирования – определять изменения технического состояния системы.

В результате, комплексное сочетание применения расчетного и экспериментального модального анализа позволяет выполнить построение тренда динамических параметров конструкции, имеющих прямую связь с изменением ее технического состояния.

Литература:

1. Зубко А. И., Аксенов С. П., Звонарев С. Л., Нецвет В. А. Создание диагностической модели при решении задачи применения вибродиагностического контроля динамики двухроторного ГТД // Турбины. Насосы. Системы. 2018. №3 (28). С. 35-43.
2. Зубко А. И., Аксенов С. П., Звонарев С. Л., Нецвет В. А., Зубко И. О. Опыт применения экспериментального модального анализа для контроля качества изготовления и сборки роторов ГТД // Насосы. Турбины. Системы. 2020. № 1(34). С. 21-31.

## **Verification of mathematical models using experimental modal analysis and their use to assess changes in the technical condition of gas turbine engine rotors**

Zubko A.I., Zvonarev S.L., Zubko A.A.

MAI, Moscow, Russia

The determination of the natural vibration frequencies of structural elements is necessary for the development of measures to eliminate or reduce resonant phenomena in the operating range of product rotation frequencies. The process of analyzing the characteristics of the rotor begins with the creation of its mathematical model and using it to conduct an analytical modal analysis, the result of which is to obtain the calculated natural frequencies and vibration forms.

When constructing a mathematical model and performing calculations, it is usually assumed that all dynamic processes have a linear relationship. In fact, this is not always the case. To solve most practical problems, the properties of non-linearity can be neglected and the result will have an insignificant error. But there are also problems that do not take into account non-linearity, in the solution of which, it can lead to a noticeable distortion of the results obtained. In most cases, the tasks of modal analysis of rotary systems of gas turbine engines (GTE) belong to the second class.

For the analysis to determine the technical condition of the gas turbine engine, the diagnostic signs of a developing defect or damage may be small deviations in the operation of the system. If you do not take into account their impact on the system, all other work may be useless. As a result of an increase in the accuracy of calculations that increase the sensitivity of the mathematical model, the number of possible incorrect solutions also increases due to an incorrect choice of initial conditions or not completely taking into account the influence of significant influencing factors, which introduces a significant error. Therefore, after creating the model, its verification is necessary. In some cases, experimental modal analysis is used for this purpose. It combines an experimental and computational approach based on the evaluation of the transfer functions between the points of entry (modal hammer impact) and exit (vibration sensor).

The presence of resonant GTD processes in the operating frequency range is not allowed, so, as a rule, during the development of engines, they are tuned to a frequency range that is higher or lower than the working one. This leads to their possible manifestation when the rotor speed increases from zero to low gas during the start-up process. Changes in the technical condition can also lead to the occurrence of resonant processes of individual parts of the rotors. Thus, with periodic monitoring, based on the results of removing the amplitude-frequency characteristic of the gas turbine engine during its operation, it is possible to track changes in the frequency values of individual resonant processes and linking the obtained values with changes in stiffness and damping – to determine changes in the technical condition of the system.

As a result, a complex combination of the application of computational and experimental modal analysis allows us to build a trend of dynamic parameters of the structure that have a direct relationship with the change in its technical condition.

### **Индукцированное шумом подавление автоколебаний (флаттера) в модели Келдыша**

<sup>1</sup>Кошечев В.П., <sup>2</sup>Штанов Ю.Н.

<sup>1</sup>МАИ, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>ТИУ, г. Сургут, Россия

Более семьдесят лет тому назад были построены нелинейные дифференциальные уравнения (модель Келдыша с одной и двумя степенями свободы [1]), автоколебательные решения которых позволили объяснить природу флаттера. Модель Келдыша [1] продолжает привлекать к себе внимание исследователей [2]. Открытым все эти годы оставался вопрос о влиянии шума на модель Келдыша. Подобная задача о влиянии шума на осциллятор Ван дер Поля была решена впервые в [3], на что было обращено внимание в [4]. В [3] было показано, что если интенсивность шума превышает некоторое критическое значение, то автоколебания исчезают. Аналогичный результат был получен в [5] с помощью стохастического уравнения эволюции энергии динамической системы с одной степенью свободы [6]. В настоящей работе стохастическое уравнение эволюции энергии динамической системы с одной степенью свободы [6] применено к модели Келдыша с одной степенью свободы, в которую включен аддитивный источник белого шума. Показано, что автоколебания (флаттер) подавляются, если интенсивность белого шума превышает критическое значение.

Литература:

1. М.В. Келдыш. О демпферах с нелинейной характеристикой // Тр. ЦАГИ, 1944, №557, с.26-37.
2. Г.А. Леонов, Н.В. Кузнецов. О подавлении флаттера в модели Келдыша // ДАН, 2018, т.482, №1, с.33-37. DOI: 10.31857/S086956520003130-6
3. П.И. Кузнецов, Р.Л. Стратонович, В.И. Тихонов. Воздействие электронных флуктуаций на ламповый генератор // ЖЭТФ, 1955, т. 28, с.509-523.
4. В. Хорстхемке, Р. Лефевр. Индуцированные шумом переходы: Теория и применение в физике, химии и биологии. – М.: Мир, 1987, 400 с.
5. В.П. Кошечев. Индуцированный шумом переход между стационарными состояниями осциллятора Ван дер Поля // Письма в ЖТФ, 2014, т.40, вып. 3, с.64-69. <https://journals.ioffe.ru/articles/27307>
6. В.П. Кошечев. Стохастическое уравнение эволюции каналированных частиц // Письма в ЖТФ, 2001, т. 27, вып. 18, с.61-64. <https://journals.ioffe.ru/articles/39235>

**Noise-induced self-oscillation (flutter) suppression in the Keldysh model**

<sup>1</sup>Koshcheev V.P., <sup>2</sup>Shtanov Yu.N.

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

<sup>2</sup>Industrial University of Tyumen, Surgut, Russia

More than seventy years ago, nonlinear differential equations were constructed (the Keldysh model with one and two degrees of freedom [1]), the self-oscillating solutions of which made it possible to explain the nature of flutter. The Keldysh model [1] continues to attract the attention of researchers [2]. The question of the influence of noise on the Keldysh model remained open all these years. A similar problem of the effect of noise on the van der Pol oscillator was solved for the first time in [3], to which attention was drawn in [4]. It was shown in [3] that if the noise intensity exceeds a certain critical value, then the self-oscillations disappear. A similar result was obtained in [5] using the stochastic equation for the evolution of the energy of a dynamical system with one degree of freedom [6]. In this paper, the stochastic equation of energy evolution of a dynamical system with one degree of freedom [6] is applied to the Keldysh model with one degree of freedom, which includes an additive source of white noise. It is shown that self-oscillations (flutter) are suppressed if the intensity of white noise exceeds a critical value.

References:

1. M.V. Keldysh. O dempferah s nelinejnoy harakteristikoj // Tr. CAGI, 1944, №557, s.26-37. [in Russian]
2. G.A. Leonov, N.V. Kuznetsov. On Flutter Suppression in the Keldysh Model // Dokl. Phys, 2018, v. 63, № 9. p. 366-370. DOI: 10.1134/S1028335818090021
3. P.I. Kuznetsov, R.L. Stratonovich, V.I. Tikhonov. The effect of electrical fluctuations on a vacuum tube oscillator. // Sov. Phys. JETP, 1955, v.1, № 3, p.510-520.
4. V. Horsthemke, R. Lefevr. Inducirovannye shumom perekhody: Teoriya i primenenie v fizike, himii i biologii. – М.: Mir, 1987, 400 s. [in Russian]
5. V.P. Koshcheev. Noise-induced transition between stationary states of a van der Pol oscillator // Tech. Phys. Lett., 2014, v.40, p.126-128. DOI: 10.1134/S1063785014020114
6. V.P. Koshcheev. A stochastic equation for the evolution of channeled particles // Tech. Phys. Lett., 2001, v.27, p.784-785. DOI: 10.1134/1.1407359

**Глубокие полумпирические сети в моделировании ползучести металлов**

<sup>1</sup>Леонов С.С., <sup>1</sup>Кузнецов Е.Б., <sup>2</sup>Васильев А.Н., <sup>2</sup>Тархов Д.А.

<sup>1</sup>МАИ, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Во многих прикладных задачах машиностроения, строительной и авиационно-космической отраслей для расчета деформационно-прочностных характеристик конструкций требуется учитывать не только упругие, но и неупругие деформации, т. е. учитывать пластичность, ползучесть и вязкость материала. Для моделирования подобных задач используются начальные и краевые задачи для систем дифференциальных уравнений, включающих набор материальных констант, подлежащих определению. Большинство

материальных констант существенно зависят как от температуры, режима нагружения и уровня напряжения, так и от состояния материала. Определение всех материальных констант является очень сложной задачей.

Традиционно материальные константы определяются исходя из их физического или геометрического смысла. Но многие материальные константы пока не имеют ясного физического или геометрического смысла. Основной задачей при построении моделей неупругого деформирования является разработка методики определения всех материальных констант определяющих соотношений. В теории ползучести подобные методики состоят в определении материальных констант как смещений и коэффициентов наклона прямых деформации-напряжения в логарифмических или полуллогарифмических координатах. Это существенно сужает класс используемых определяющих уравнений, что снижает качество моделирования.

В данной работе авторами предложен более универсальный подход к идентификации моделей сложных технологических процессов – полумпирические нейронные сети [1]. Разрабатываемый метод комбинирует традиционные явные и неявные численные схемы решения начальных и краевых задач для систем дифференциальных уравнений в областях переменного размера и глубокие нейронные сети. В результате получены глубокие полумпирические рекуррентные нейронные сети. В них сочетаются гибкость глубоких сетей с накопленными результатами по оценке точности и эффективному применению традиционных явных и неявных численных схем.

Для задачи идентификации моделей полумпирические сети позволяют в независимости от вида определяющих соотношений получать значения материальных констант, т. е. вид модели в форме системы дифференциальных уравнений, а также находить решение имеющейся системы уравнений с начальными или краевыми условиями в форме нейросетевого разложения.

В качестве демонстрации возможностей полумпирических сетей рассмотрена задача построения модели ползучести и разрушения цилиндрических образцов из стали 45 при одноосном растяжении с постоянной температурой и напряжением. Полученные значения материальных констант показывают хорошее согласование с уже известными результатами решения рассматриваемой задачи другими авторами. В ряде случаев полумпирические сети позволяют получить более точное согласование между экспериментом и результатами моделирования. В целом же можно отметить, что полумпирические сети показывают универсальность, быстрое действие и точность при решении задач идентификации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 19-08-00718А).

Литература:

1. Tarkhov D., Vasilyev A. Semi-empirical Neural Network Modeling and Digital Twins Development. Academic Press, Elsevier, 2019. 288p.

2. Кузнецов Е.Б., Леонов С.С. Методика выбора функций определяющих уравнений ползучести и длительной прочности с одним скалярным параметром поврежденности // Прикладная механика и техническая физика. 2016. Т. 57, № 2. С. 202-211.

### **Deep semi-empirical networks in the simulation of metal creep**

<sup>1</sup>Leonov S.S., <sup>1</sup>Kuznetsov E.B., <sup>2</sup>Vasilyev A.N., <sup>2</sup>Tarkhov D.A.

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

<sup>2</sup>SPbPU, Saint-Petersburg, Russia

In many applied problems of mechanical engineering, civil engineering, and aerospace industry, to calculate the deformation and strength characteristics of structures, it is necessary to take into account not only elastic but also inelastic deformations, i.e., to take into account the plasticity, creep and viscosity of the material. For modeling such problems, we use initial and boundary value problems for systems of differential equations. As a rule, considered constitutive equations including a set of material constants to be determined. However, most material constants depend significantly on the temperature, the state of the material, the stress level, and the loading mode. Therefore, determining all material constants is a complicated task.

Traditionally, material constants are determined based on their physical or geometric meaning. However, many material constants do not yet have a clear physical or geometric meaning.

Therefore, the main task in constructing models of inelastic deformation is to develop a methodology for determining all constitutive equation material constants. For example, in creep theory, such techniques determine material constants as displacements and angular coefficients of strain-stress lines in logarithmic or semi-logarithmic coordinates. Unfortunately, this methodology significantly narrows the class of defining equations used, which reduces the quality of modeling.

In this paper, the authors propose a universal approach to identifying models of complex technological processes – semi-empirical neural networks. The developed method combines traditional explicit and implicit numerical schemes for solving initial and boundary value problems for systems of differential equations in regions of variable size and deep neural networks. Semi-empirical networks combine the flexibility of deep networks with accumulated results on evaluating the accuracy and practical application of traditional explicit and implicit numerical schemes.

For identifying models, semi-empirical networks allow, regardless of the constitutive relations, to obtain the values of material constants, i.e., the type of model in the form of a system of differential equations. The method also allows finding a solution to the existing system of equations with initial or boundary conditions in the form of a neural network decomposition.

We demonstrate the capabilities of semi-empirical networks to construct a model of creep and fracture of cylindrical samples made of St.45 steel under uniaxial tension with constant temperature and stress. The obtained values of the material constants show a good agreement with the already known results of solving the considered problem by other researchers. In some cases with semi-empirical networks, it is possible to obtain a more accurate agreement between the experiment and the simulation results. In general, we can note that semi-empirical networks show universality, quickness, and high accuracy in solving identification problems.

The work was carried out with the financial support of the RFBR (project 19-08-00718A).

References:

1. Tarkhov D., Vasilyev A. Semi-empirical Neural Network Modeling and Digital Twins Development. Academic Press, Elsevier, 2019. 288p.
2. Kuznetsov E.B., Leonov S.S. Technique for selecting the functions of the constitutive equations of creep and long-term strength with one scalar damage parameter // J. of Applied Mech. and Tech. Phys. 2016. Vol. 57, № 2. Pp. 369-377.

### **Определение траектории наискорейшего перемещения летательного аппарата между двумя точками в атмосфере переменной плотности под действием гравитации**

Малашкин А.В.

МАИ, г. Москва, Россия

В докладе речь идет об определении траектории летательного аппарата с наименьшим временем перемещения между начальной и конечной точками с учетом силы аэродинамического сопротивления и зависимости плотности атмосферы от высоты. Также вычисляются скорость и сумма кинетической и потенциальной энергии аппарата. Летательный аппарат может иметь не нулевую начальную скорость. Для минимизации функционала времени движения вдоль траектории использовался метод последовательных коллокаций. Если не учитывать изменение плотности атмосферы по высоте, то результаты подобны [1].

Влияние переменной плотности атмосферы на аэродинамическое сопротивление приводит к существенным изменениям формы траекторий на разных высотах. Также изменяются время движения и графики скорости аппарата. Используемый метод позволяет учитывать разнообразные ограничения на характеристики аппарата и его траектории.

Рассмотрены зависимости формы траектории, графиков скорости, полной энергии и времени движения аппарата от его массы, аэродинамического сопротивления, высот начальной и конечной точки и расстояния между ними.

Программа была реализована в среде Qt5. Использовался язык C++17.

Литература:

1. A. Craifaleanu, R. A. Petre Influence of drag force upon the shortest time trajectory of an aircraft // 3rd International Workshop on Numerical Modelling in Aerospace Sciences, NMA

2015, 06-07 May 2015, Bucharest, Romania, 21.10.03. [Электронный ресурс] URL: [https://bulletin.incas.ro/files/craifaleanu\\_\\_petre\\_\\_vol\\_7\\_iss\\_2.pdf](https://bulletin.incas.ro/files/craifaleanu__petre__vol_7_iss_2.pdf) (дата обращения: 30.06.2021).

### **Determination of the shortest time trajectory of the aircraft between two points in the atmosphere of variable density under the action of gravity**

Malashkin A.V.

MAI, Moscow, Russia

The report deals with the determination of the trajectory of the aircraft with the shortest travel time between the initial and final points, taking into account the force of aerodynamic drag and the dependence of the density of the atmosphere on the height. The speed and the sum of the kinetic and potential energy of the apparatus are also calculated. The aircraft may have a non-zero initial speed. To minimize the functional of the time of movement along the trajectory, the method of successive collocations was used. If we do not take into account the change in the density of the atmosphere with respect to altitude, the results are similar [1].

The effect of variable atmospheric density on aerodynamic drag leads to significant changes in the shape of the trajectories at different altitudes. The movement time and speed graphs of the vehicle also change. The method used makes it possible to take into account various restrictions on the characteristics of the vehicle and its trajectory.

The dependencies of the shape of the trajectory, graphs of speed, total energy and time of movement of the vehicle on its mass, aerodynamic drag, altitude of the starting and ending points and the distance between them are considered.

To implement this idea, a program code was generated in the Qt5 programming environment. At the same time, the C++17 programming language was used.

References:

1. A. Craifaleanu, R. A. Petre Influence of drag force upon the shortest time trajectory of an aircraft // 3rd International Workshop on Numerical Modelling in Aerospace Sciences, NMAS 2015, 06-07 May 2015, Bucharest, Romania, 21.10.03. [Electronic resource] URL: [https://bulletin.incas.ro/files/craifaleanu\\_\\_petre\\_\\_vol\\_7\\_iss\\_2.pdf](https://bulletin.incas.ro/files/craifaleanu__petre__vol_7_iss_2.pdf) (date of treatment: 30.06.2021).

### **Применение прогрессивных методов математического моделирования для анализа формообразования гнутых профилей**

Маркова Е.В.

Самарский университет, г. Самара, Россия

К применяемым в производстве летательных аппаратов профилям из алюминиевых сплавов с плакирующим слоем предъявляются повышенные требования в отношении сохранности плакирующего слоя и утонения основного материала. Однако производство профилей с толщиной стенок более 2 мм вызывает нарушение плакирующего слоя из-за больших контактных давлений при осадке заготовки, что характерно для стеснения изгиба. При данных обстоятельствах целесообразным является применение метода интенсивного деформирования, в котором формообразование профиля осуществляется с постоянными радиусами изгиба на всех технологических переходах. Схема формообразования профиля при использовании МИД является также достаточно «жесткой» из-за больших углов подгибки на первых переходах и также приводит к утонению заготовки и сравнительно большим контактным напряжениям. Гипотетически, уменьшение углов подгибки в первых клетях станка и переход к плавно изменяющемуся радиусу изгиба угловых зон при формообразовании могли бы уменьшить уровень контактных напряжений и деформационных характеристик заготовки. Для сопоставления аналитической модели с результатами конечно-элементного моделирования и экспериментальных работ, проведено проектирование и отработка технологии производства корытного профиля 30,5x8,5x2 мм. Ожидаемый результат при варьировании промежуточных радиусов заготовки (радиусов на предварительных переходах) состоит в возможном уменьшении утонения и снижении уровня контактных напряжений в угловых зонах. В связи с этим, изучается влияние на параметры профиля схемы формообразования, типичной для МИД и более мягкой схемы. Для конечно-элементного моделирования использовали модуль LS-DYNA интегрирования пакета ANSYS, с помощью которого моделировали обе схемы формообразования для

выявления утонения в зонах изгиба профиля и величин контактных напряжений. Результаты моделирования показывают, что в зоне изгиба отличие утонение профилей составляют около 20%.

Литература:

1. В.И. Филимонов. Формообразование гнутых профилей: теория и практика: Сборник научных трудов / под науч. ред. д-ра техн. наук, профессора В. И. Филимонова. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – 166 с.

2. В. И. Филимонов, О.В. Мищенко. Производство гнутых профилей с отбортовками в роликах методом интенсивного деформирования / О.В. Мищенко, В. И. Филимонов. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – 122 с.

### **The Application of Progressive Methods of Mathematical Modeling for the Analysis of the Shaping of Roll-formed Profiles**

Markova E.V.

Samara University, Samara, Russia

The profiles of aluminum alloys with a cladding layer used in the production of aircraft, increased requirements are imposed with respect to the safety of the cladding layer and the thinning of the base material. However, the production of profiles with a wall thickness of more than 2 mm causes a violation of the cladding layer due to high contact pressures during upsetting of the workpiece, which is typical for bending constraint. Under these circumstances, it is advisable to use the method of intense deformation, in which the shaping of the profile is carried out with constant bending radii at all technological transitions. The profile shaping scheme when using the MID is also quite "rigid" due to the large bending angles at the first transitions and also leads to a thinning of the workpiece and relatively high contact stresses. Hypothetically, a decrease in the bending angles in the first stands of the machine and the transition to a smoothly varying bending radius of the corner zones during shaping could reduce the level of contact stresses and deformation characteristics of the workpiece. To compare the analytical model with the results of finite element modeling and experimental work, the design and development of the technology for the production of a trough profile 30.5x8.5x2 mm was carried out. The expected result when varying the intermediate radii of the workpiece (radii at preliminary transitions) is a possible decrease in thinning and a decrease in the level of contact stresses in the corner zones. In this regard, the influence on the parameters of the profile of the shaping scheme, typical for MFA and a softer scheme, is being studied. For finite element modeling, the LS-DYNA integration module of the ANSYS package was used, with the help of which both shaping schemes were simulated to reveal thinning in the profile bending zones and the values of contact stresses. The simulation results show that in the bend zone, the difference in the thinning of the profiles is about 20%.

References:

1. V. I. Filimonov. Formation of roll-formed profiles: theory and practice: Collection of scientific works / under scientific. ed. Dr. Tech. Sciences, Professor V.I. Filimonov. - Ulyanovsk: UISTU, 2011.--166 p.

2. V. I. Filimonov, O. V. Mishchenko. Production of bent profiles with flanges in rollers by the method of intensive deformation / O.V. Mishchenko, V.I. Filimonov. - Ulyanovsk: UISTU, 2011.--122 p.

### **Математическое моделирование аэродинамического нагрева аппаратурных отсеков беспилотных летательных аппаратов**

Матковский Н.О.

АО «ГосМКБ «Вымпел» им. И.И. Торопова», г. Москва, Россия

Современные программные пакеты, предназначенные для решения различных инженерных задач, разнообразны и включают в себя как системы для твердотельного моделирования, так и продукты, позволяющие расчетными методами оценить модели изделий в реальных условиях эксплуатации. В работе проанализирован аэродинамический нагрев аппаратурного отсека беспилотного летательного аппарата на гипотетической траектории полета. Для оценки аэродинамического нагрева используется среда компьютерного инжиниринга «SOLIDWORKS Flow Simulation». Преимуществом данного

продукта является минимальное время на подготовку исходных данных и просмотра результатов.

Математические модели представляют собой систему отражающих законы физики дифференциальных и/или интегральных уравнений с граничными и начальными условиями, привязывающими данную математическую модель к поставленной физической задаче. Используемые в математической модели системы уравнений приводятся к дискретному виду и решаются в некоторой расчетной сетке. Решение задачи проводится методом конечных элементов в нестационарной постановке. Работа проводится в два этапа: решение внешней задачи по определению граничных условий на поверхности и внутренней задачи по распределению тепла внутри конструкции. Движение и теплообмен текучей среды моделируется при помощи уравнений Навье-Стокса, описывающих в нестационарной постановке законы сохранения массы, импульса и энергии текучей среды, а также эмпирические зависимости вязкости и теплопроводности этих компонентов среды от температуры. [1]

В работе показано, что использование современных систем компьютерного моделирования для решения задач математического моделирования физических процессов существенно упрощает работу практикующих инженеров. Существующие системы автоматизированного проектирования позволяют проводить модернизацию перспективных летательных аппаратов, их летные характеристики, оценивать различные воздействующие на конструкцию факторы без использования дорогостоящих натурных испытаний.

Результатом решения задачи математического моделирования аэродинамического нагрева аппаратного отсека беспилотного летательного аппарата является картина распределения полей температур на всем участке полета, что позволяет проводить дальнейший анализ и модернизацию исследуемого объекта.

Литература:

1. Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В., Харитонович А.И., Пономарев Н.Б. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 169с.

### **Mathematical simulation of aerodynamic heating in unmanned aerial vehicles hardware compartments**

Matkovskiy N.O.

JSC "SMBDB "Vypel" of I.I. Toropov", Moscow, Russia

Modern software packages designed to solve various engineering problems are diverse and include both systems for solid-state modeling and products that allow calculating methods to evaluate product models in real operating conditions. The paper analyzes the aerodynamic heating of the instrument compartment of an unmanned aerial vehicle on a hypothetical flight trajectory. The computer engineering environment "SOLIDWORKS Flow Simulation" is used to evaluate the aerodynamic heating. The advantage of this product is the minimum time to prepare the source data and view the results.

Mathematical models are a system of differential and/or integral equations reflecting the laws of physics with boundary and initial conditions that bind this mathematical model to the given physical problem. The systems of equations used in the mathematical model are reduced to a discrete form and solved in a certain computational grid. The solution of the problem is carried out by the finite element method in a non-stationary formulation. The work is carried out in two stages: the solution of the external problem of determining the boundary conditions on the surface and the internal problem of heat distribution inside the structure. The motion and heat transfer of the fluid is simulated using the Navier-Stokes equations, which describe the laws of conservation of mass, momentum, and energy of the fluid in a nonstationary setting, as well as the empirical dependences of the viscosity and thermal conductivity of these components of the medium on temperature.

The research shows that the using of modern computer simulation systems for solving problems of mathematical simulation of physical processes significantly simplifies the work of practicing engineers. Existing computer-aided design systems make it possible to modernize promising

aircraft, their flight characteristics, and evaluate various factors affecting the design without the use of expensive field tests.

The result of solving the problem of mathematical simulation of the aerodynamic heating of the instrument compartment of an unmanned aerial vehicle is a picture of the distribution of temperature fields over the entire flight section, which allows for further analysis and modernization of the object under study.

### **Исследование распыла топлива в пневматической форсунке методом объема жидкости**

Мингалев С.В., Худяков Д.С.

АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь, Россия

Исследование посвящено моделированию методом объема жидкости распыла топлива в пневматической форсунке из патента РФ 2615618. Вначале эта задача была решена в полной постановке на сетках с недостаточной высокой разрешающей способностью для описания мелких капель. Затем несимметричная часть форсунки была заменена плоскостью, на которой задавалась полученная из предыдущего расчета усредненная по азимутальному углу скорость газа и топлива. В рамках такого подхода задача решалась 1) в квазидвухмерной осесимметричной постановке, в которой все величины считаются независимыми от азимутального угла, 2) в 5-градусном секторе форсунки. Для получения размеров капель, на которые бы эти сгустки распались при рассмотрении задачи в трехмерной постановке, была использована формула Вэбера, применявшаяся в разработанной для центробежных форсунок модели распада топливной пленки LISA [1]. Сравнение полученного таким образом из квазидвухмерного расчета распределения капель по размерам с тем, которое было найдено при расчете в 5-градусном секторе, показало, что если размеры ячеек расчетной сетки достаточно малы, то эти два распределения оказываются близки друг к другу [2]. Этот результат обосновал возможность исследования размеров капель в квазидвухмерной осесимметричной постановке. Такой подход требует существенно меньших вычислительных ресурсов по сравнению с трехмерным, что позволило на сетках с разрешением достаточным для описания самых мелких капель исследовать влияние на их размеры параметров топлива: вязкости, поверхностного натяжения, плотности и его расхода. Сравнение с имеющимися в литературе эмпирическими формулами показало, что найденные зависимости от вязкости, плотности и расхода наилучшим образом описываются формулой Aigner [3]. В случае зависимости от поверхностного натяжения формула Aigner дает немного более быстрый рост среднего заулеровского диаметра, чем полученный на основании расчетов.

Литература:

1. Schmidt D. et al. Pressure-Swirl Atomization in the Near Field // SAE Technical Paper 1999-01-0496. 1999. DOI: 10.4271/1999-01-0496.
2. Mingalev S. et al. Simulation of Primary Film Atomization in Prefilming Air-assisted Atomizer Using Volume-of-Fluid Method // Microgravity Science and Technology. 2020. V. 32, pp. 465 – 476. DOI: 10.1007/s12217-020-09782-3
3. Aigner M.M. Charakterisierung der bestimmenden einflussgrößen bei der luftgestützten zerstäubung: physikalische grundlagen und messtechnische erfassung // PhD thesis, Universität Karlsruhe, 1986.

### **Simulation of fuel atomization in air-assisted atomizer by VOF method**

Mingalev S.V., Khudyakov D.S.

JSC “UEC-Aviadvigatel”, Perm, Russia

The research is devoted to the simulation of fuel atomization in the air-assisted atomizer RU2615618 by the volume of fluid method. First, the problem was solved in case of the original geometry with fuel channels and swirlers, albeit with mesh which wasn't fine enough to describe tiny droplets. Then, the asymmetrical part of air-assisted atomizer was substituted by a flat surface which became a new boundary condition for velocity received by azimuth averaging of velocity in the previous calculation. In frame of this approach we simulated the fuel atomization, first, in axisymmetric swirl problem statement and, second, in 5-degree sector. The former leads to the

simulation of toroidal ligaments instead of droplets. In order to get the droplet diameter from the sizes of ligaments, we used the Weber's formula (1931) which was used for the same purposes in pressure-swirl atomizer model LISA [1]. The droplet size distributions obtained in the axisymmetric swirl problem statement and 5-degree sector are very close if the smallest cell sizes of mesh are small enough [2]. This result substantiates the study of the influence of fuel properties on the droplet-size distribution in axisymmetric swirl approximation, which showed that the dependences of Sauter mean diameter on viscosity, density and flow rate of fuel in the air-assisted atomizer are well described by Aigner's formula [3]. Though the increase of Sauter mean diameter with increase of coefficient of surface tension is lower in the simulation than that predicted by Aigner's formula.

References:

1. Schmidt D. et al. Pressure-Swirl Atomization in the Near Field // SAE Technical Paper 1999-01-0496. 1999. DOI: 10.4271/1999-01-0496.
2. Mingalev S. et al. Simulation of Primary Film Atomization in Prefilming Air-assisted Atomizer Using Volume-of-Fluid Method // Microgravity Science and Technology. 2020. V. 32, pp. 465 – 476. DOI:10.1007/s12217-020-09782-3
3. Aigner M.M. Charakterisierung der bestimmenden einflussgrößen bei der luftgestützten zerstäubung: physikalische grundlagen und messtechnische erfassung // PhD thesis, Universität Karlsruhe, 1986.

### **Разработка численной модели медицинского электронного пучка для моделирования взаимодействия электронов с веществом методом Монте-Карло**

Нгуен Туан Ань, Григорьева А.А., Черепенников Ю.М., Стучебров С.Г.

ТПУ, г. Томск, Россия

Основной целью лучевой терапии является уничтожение злокачественных клеток ионизирующим излучением при минимизации негативного влияния на здоровые ткани [1, 2]. Существует ряд исследований, направленных на разработку персонализированных методов облучения пациентов [3]. Для оценки эффективности новых предлагаемых подходов к использованию медицинских электронных пучков, необходимо проводить численное моделирование процессов взаимодействия ионизирующего излучения с веществом [4].

В данной работе с использованием инструментария Geant4 была разработана численная модель системы формирования выведенного электронного пучка медицинского ускорителя. Geant4 является одним из наиболее надежных инструментариев, позволяющих моделировать процессы переноса ионизирующего излучения в среде методом Монте-Карло [4].

Схема численного эксперимента была выбрана в соответствии со стандартными параметрами медицинского облучения. Точечный источник электронов находился в вакуумной камере на расстоянии 100 см от поверхности водного фантома. Пучок электронов проходит через типичную схему формирования и попадает на водный фантом. Схема формирования клинического электронного пучка включает в себя: выходное окно из вакуумной камеры, рассеивающую фольгу, первичный коллиматор, выравнивающий фильтр, мониторную ионизационную камеру проходного типа, вторичный коллиматор с независимыми створками. Дополнительно был добавлен аппликатор, представляющий собой сборное устройство на крепежной пластине, позволяющий формировать поле  $10 \times 10$  см<sup>2</sup>. Параметры каждого элемента при разработке геометрии моделирования были подобраны путем сравнения результатов моделирования распределений дозы электронного пучка в водном фантоме с экспериментальными данными, полученными для медицинского ускорителя ONCOR Impression Plus (Siemens). При создании модели использовалась встроенная функция инструментария Geant4, позволяющая задавать Гауссово распределение энергии, через такие параметры как, средняя энергия пучка и среднеквадратическое отклонение. Выбор данных параметров также осуществлялся на основании сравнения расчетных и экспериментальных зависимостей.

В результате работы была создана численная модель медицинского электронного пучка, разработанная с учетом типичной системы формирования и стандартных параметров медицинского облучения, которая позволяет проводить оценку распределений дозы электронного пучка медицинского ускорителя тканеэквивалентных средах.

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения 075-15-2021-273, проект № МК-4867.2021.1.2.

Литература:

1. Gerber D. E., Chan T. A. Recent advances in radiation therapy //American family physician. – 2008. – Т. 78. – №. 11. – С. 1254-1262.
2. Baskar R. et al. Cancer and radiation therapy: current advances and future directions //International journal of medical sciences. – 2012. – Т. 9. – №. 3. – С. 193.
3. Aristei C. et al. Personalization in Modern Radiation Oncology: Methods, Results and Pitfalls. Personalized Interventions and Breast Cancer //Frontiers in Oncology. – 2021. – Т. 11. – С. 461.
4. Allison J. et al. Recent developments in Geant4 //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2016. – Т. 835. – С. 186-225.

### **Numerical model of therapeutic electron beam for Monte Carlo simulation of electrons interaction with matter**

Nguyen Tuan Anh, Grigorieva A.A., Cherepennikov Y.M., Stuchebrov S.G.  
TPU, Tomsk, Russia

Main goal of radiation therapy is to destroy malignant cells with ionizing radiations, with minimal negative impact on healthy tissues [1, 2]. Currently, a number of studies aims to development of patient-specific approaches for medical radiation exposure [3]. To evaluate the efficiency of new approaches for medical electron beam applications, it is necessary to perform numerical simulations of ionizing radiation interaction with matter [4].

In this study Geant4 toolkit was used to develop numerical model of ejected electron beam forming system of clinical accelerator. Geant4 is the one of the most reliable toolkits, providing Monte Carlo simulations of radiation transfer in different media [4].

The scheme of the numerical experiment was chosen in accordance with the standard parameters of medical radiation exposure. A point source of electrons was located in a vacuum chamber at a distance of 100 cm from the surface of the water phantom. The electron beam passed through a typical forming system and fell on the water phantom. Clinical electron beam forming system included: a vacuum chamber output window, a scattering foil, a primary collimator, a flattening filter, a transparent monitor ionization chamber, and a secondary collimator with independent jaws. Additionally, an applicator, which is a device mounted on the assembly plate providing shaping of the  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  dose field, was included in the model. The parameters of each unit of the designed simulation geometry were selected by comparing the results of simulated dose distributions of the electron beam in the water phantom with the experimental data obtained for the medical accelerator ONCOR Impression Plus (Siemens). Geant4 built-in function for setting the Gaussian beam energy distribution through an average beam energy and standard deviation values was used in the model. Selection of these values was also done based on comparison of calculated and experimental dependences.

As a result of the study, we developed numerical model of therapeutic electron beam, taking into account a typical beam forming system and medical exposure parameters. This model can be used to evaluate dose distributions of medical accelerator electron beam in tissue-equivalent media.

The work is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within agreement 075-15-2021-273, project No. МК-4867.2021.1.2.

References:

1. Gerber D. E., Chan T. A. Recent advances in radiation therapy //American family physician. – 2008. – V. 78. – №. 11. – P. 1254-1262.
2. Baskar R. et al. Cancer and radiation therapy: current advances and future directions //International journal of medical sciences. – 2012. – V. 9. – №. 3. – P. 193. doi: 10.7150/ijms.3635
3. Aristei C. et al. Personalization in Modern Radiation Oncology: Methods, Results and Pitfalls. Personalized Interventions and Breast Cancer //Frontiers in Oncology. – 2021. – V. 11. – P. 461. doi: 10.3389/fonc.2021.616042
4. Allison J. et al. Recent developments in Geant4 //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2016. – V. 835. – P. 186-225. doi: 10.1016/j.nima.2016.06.125

## **Исследование фотогальванического эффекта для расчета стационарного электрического тока при облучении фотоэлектрического преобразователя переменным электромагнитным полем**

Погорелов А.В., Чернышов Н.Н., Белоусов А.В.  
БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

Фотогальванический эффект заключается в возникновении фотогальванического тока при облучении полупроводникового р-п перехода, включенного в замкнутую цепь. Он используется в фотоэлектрических преобразователях. Все известные механизмы влияния света на вещество сводятся к изменению проводимости или концентрации носителей заряда. Движущей силой для появления фотогальванического эффекта является либо внешнее электрическое поле, либо градиент концентрации носителей заряда. Для определения фотогальванического тока была построена математическая модель преобразователя солнечной энергии на основании GaAs.

Цель научной работы заключается в исследовании фотогальванического эффекта для получения значения стационарного электрического тока под действием переменного электромагнитного поля для улучшения выходных характеристик фотоэлектрического преобразователя.

При проведении исследований с применением программы COMSOL Multiphysics были решены следующие задачи:

1. Исследовано воздействие переменного напряжения на однородную среду без центра инверсии, которое сопровождается стационарным фотогальваническим током, зависящим от асимметрии рассеяния электронов на примесях и фононах;
2. Изучены оптические переходы между спиновыми уровнями в квантовом магнитном поле, которые приводят к возникновению резонансного фотогальванического эффекта, обусловленного интерференцией различных амплитуд перехода;
3. Исследована высокочастотная диэлектрическая проницаемость разупорядоченной среды при возникновении хаотических резонансно-поглощающих областей.

Практическое значение полученных результатов заключается в исследовании фотогальванического эффекта для преобразователей солнечной энергии. Значимость результатов определяется необходимостью детального исследования многих фотогальванических явлений, которые к настоящему времени недостаточно изучены. К ним относятся – фотогальванический эффект в кубических кристаллах без центра инверсии, пленочный фотогальванический эффект при межзонных переходах, резонансный фотогальванический эффект в квантово-размерной системе. Исследования направлены на улучшение коэффициента полезного действия и выходных характеристик фотоэлектрических преобразователей.

Литература:

1. Okashita T. Resonant-photoelectromagnetic effects in farin frared regions for compound semiconductors. J. Phys. Soc. Japan, v.67, 1998. – P.675 -678.
2. Tang C.S., Chu C.S. No adiabatic quantum pumping in mesoscopic nanostructures. Solid State Commun., v.120, 2001. – P.353 -357.
3. Chernyshov N.N., Belousov A.V., Gvozdevskiy I.N., Slipchenko N.I., Khansaa A. Ghazi, Alkhalwaldeh M. Spin resonance in a semiconductor structure in quantizing magnetic field International seminar on electron devieces design and production (SED). Proceedings. Prague (CH), 23-24.04.2019. – 3p

### **Investigation of the photovoltaic effect for calculating a stationary electric current when a photoelectric converter is irradiated with an alternating electromagnetic field**

Pogorelov A.V., Chernyshov N.N., Belousov A.V.  
BSTU, Belgorod, Russia

The photovoltaic effect consists in the generation of a photovoltaic current upon irradiation of a semiconductor p-n junction included in a closed circuit. The effect is used in photovoltaic converters. All known mechanisms of the influence of light on a substance are reduced to a change in the conductivity or concentration of charge carriers. The driving force for the appearance of the photovoltaic effect is either an external electric field or a concentration gradient of charge carriers.

A mathematical model of a solar energy converter based on GaAs was built to determine the photovoltaic current.

The purpose of the scientific study is to research the photoelectric effect for obtaining the value of a stationary electric current when exposed to an alternating electromagnetic field to improve the output characteristics of the photoelectric converter.

The following tasks were solved when researching using the COMSOL Multiphysics software:

1. The effect of an alternating voltage on a homogeneous medium without an inversion center, which is accompanied by a stationary photovoltaic current, which depends on the asymmetry of electron scattering by impurities and phonons, has been investigated;
2. Optical transitions between spin levels in a quantum magnetic field, which bring to the appearance of a resonant photovoltaic effect caused by the interference of different transition amplitudes, have been studied;
3. The high-frequency dielectric constant of a disordered medium with the appearance of chaotic resonant-absorbing regions is investigated.

The practical significance of the results consist in the research of the photovoltaic effect for solar energy converters. The importance of the results is determined by insufficient research of many photovoltaic phenomena at the present time. These are the photovoltaic effect in cubic crystals without an inversion center, the film photovoltaic effect at interband transitions, and the resonant photovoltaic effect in a quantum-dimensional system. The research is aimed at improving the efficiency and output characteristics of photovoltaic converters. References:

References:

1. Okashita T. Resonant-photoelectromagnetic effects in farin frared regions for compound semiconductors. J. Phys. Soc. Japan, v.67, 1998. – P.675 -678.
2. Tang C.S., Chu C.S. No adiabatic quantum pumping in mesoscopic nanostructures. Solid State Commun., v.120, 2001. – P.353 -357.
3. Chernyшов N.N., Belousov A.V., Gvozdevskiy I.N., Slipchenko N.I., Khansaa A. Ghazi, Alkhawaldeh M. Spin resonance in a semiconductor structure in quantizing magnetic field International seminar on electron devices design and production (SED). Proceedings. Prague (CH), 23-24.04.2019. – 3p

### **Моделирование рабочих процессов гидромашин силовых приводов беспилотной техники**

Пузанов А.В., Даршт Я.А.

КГТА, г. Ковров, Россия

Силовой электрогидропривод и его компоненты при минимальных массогабаритных характеристиках должны обеспечивать надежность и устойчивость к механическим воздействиям (вибрациям, трибомеханическим взаимодействиям, ударам, инерционным нагрузкам и т.д.), температурным и климатическим воздействиям и т. д.

Поскольку моделирование характеристик электрогидроприводов, гидромашин и гидроаппаратуры должно охватывать моделирование силовых, динамических и статических характеристик, необходимо проведение комплексного моделирования их энергетических, силовых, температурных и т.п. характеристик. При этом решается широкий круг задач: от обоснования схемных решений и компоновки силового привода до разработки системы управления.

При форсировании существующих конструкций гидроприводов по существующим методикам, наблюдалось резкое снижение ресурса вплоть до разрушения элементов конструкции.

В исследуемой модели использован тезис о силовом гидроприводе как совокупности упругих тел, взаимодействующих между собой посредством связей, характеризующихся нелинейностями различной природы (физическими, геометрическими, кинематическими, трибо- и гидромеханическими и др.). При рассмотрении учитывались факторы деформации, упругого и упругопластического взаимодействия, термомеханики, гидромеханики, трибоконтакта деталей с учетом зазоров, шероховатости, различных моделей трения и др.

Сравнительный анализ результатов моделирования и экспериментальных данных показал их хорошую сходимость (от 1% до 3%) и лежит в диапазоне разброса значений при натуральных измерениях.

Исследования с использованием многопрофильного математического аппарата позволили аналитически получить оптимальное соотношение конструктивно-технологических и технических и эксплуатационных параметров гидравлической машины.

Полученные результаты позволили перейти на качественный уровень моделирования рабочих процессов гидравлической машины, сократить на порядок (за счет уменьшения количества ложных итераций) сроки проектирования новых изделий, провести модернизацию в части повышения ресурсной надежности и расширение существующего ассортимента продукции для повышения надежности и долговечности выпускаемой серийно продукции.

Литература:

1. Deeken, Michael. Simulation der Umsteuergeometrie von Schrägscheibeneinheiten mit Hilfe gangiger CAE-Tools / Michael Deeken // *Olhydraul. und Pneum.* –2002. –№6. –С. 374-377.

2. Даршт, Я.А. Исследования гидростатических опор плунжеров высоконагруженных аксиально-поршневых гидромашин / Я.А. Даршт, И.Н. Холкин, А.В. Пузанов // *Автоматизация и современные технологии.* –2004. –№3. –С. 7-13.

3. Пузанов, А.В. Моделирование контактных взаимодействий деталей ходовой части аксиально-поршневых гидромашин средствами MSC.AFEA (часть I) / А.В. Пузанов // *CAD/CAM/CAE Observer.* – 2008. – № 5. – С. 85-87.

4. Пузанов, А.В. Анализ гидромеханики распределительного узла аксиально-плунжерной гидромашин / А.В. Пузанов // *Инженерный вестник*, 2016, №2. – С.1-9.

5. Пузанов, А.В. Гидромеханический анализ ходовой части аксиально-поршневой гидромашин / А.В. Пузанов // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2016, № 4 (52). –С. 161-169.

6. Пузанов, А.В. Расчет взаимодействия рабочей жидкости с деформированными стенками пар трения ходовых частей объемных гидромашин / А.В. Пузанов // *Справочник. Инженерный журнал с приложением*. 2016. № 6 (231). С. 21-25.

### **Modeling of working processes of hydraulic machines of power drives of unmanned vehicles**

Puzanov A.V., Darst Ya.A.

KSTA, Kovrov, Russia

Power electrohydraulic drive and its components with minimum weight and size characteristics must ensure reliability and resistance to mechanical influences (vibrations, tribomechanical interactions, shocks, inertial loads, etc.), temperature and climatic influences, etc.

Since the modeling of the characteristics of electric hydraulic drives, hydraulic machines and hydraulic equipment should cover the modeling of power, dynamic and static characteristics, it is necessary to carry out a comprehensive modeling of their energy, power, temperature, etc. characteristics. At the same time, a wide range of tasks is solved: from substantiating circuit solutions and the layout of a power drive to developing a control system.

When forcing the existing designs of hydraulic drives according to the existing methods, a sharp decrease in the resource was observed up to the destruction of structural elements.

In the model under study, the thesis about a hydraulic power drive as a set of elastic bodies interacting with each other through links characterized by nonlinearities of various nature (physical, geometric, kinematic, tribo- and hydromechanical, etc.) is used. The consideration took into account the factors of deformation, elastic and elastoplastic interaction, thermomechanics, hydromechanics, tribocontact of parts, taking into account clearances, roughness, various models of friction, etc.

A comparative analysis of the simulation results and experimental data showed their good convergence (from 1% to 3%) and lies in the range of scatter of values during field measurements.

Research with the use of a multidisciplinary mathematical apparatus made it possible to analytically obtain the optimal ratio of the design-technological, technical and operational parameters of the hydraulic machine.

The results obtained made it possible to move to a high-quality level of modeling the working processes of a hydraulic machine, to reduce by an order of magnitude (by reducing the number of false iterations) the design time for new products, to carry out modernization in terms of increasing resource reliability and expanding the existing range of products to increase the reliability and durability of mass-produced products.

### **Исследование многофункционального приемника воздушных давлений**

<sup>1</sup>Рыбаков С.В., <sup>2</sup>Сорокин М.Ю.

<sup>1</sup>АО «УКБП», <sup>2</sup>УлГТУ, г. Ульяновск, Россия

Многофункциональный приемник позволяет измерить такие параметры как: полное и статическое давления, углы атаки и скольжения воздушного судна.

Ранее были предложены модификации МПВД без центрального отверстия приема полного давления, для проведения исследования был выбран вариант полусферического МПВД меньшего диаметра (18 мм) со сквозными отверстиями.

Исследование проводилось при помощи математического моделирования в рабочей среде Ansys, задача углов атаки и скольжения производилась путем разложения вектора скорости по ортонормированному базису.

Были проведены исследования модели приемника на диапазоне углов атаки и скольжения 0...25 градусов с шагом в 5 градусов на скоростях 0,084 ед.ч.Маха (100 км/ч), 0,25 ед.ч.Маха (300 км/ч) и 0,42 ед.ч.Маха (500 км/ч).

По результатам исследования были составлены полиномы третьего и четвертого порядка для расчета скорости воздушного потока и аэродинамических углов соответственно с использованием четырех местных измеряемых давлений.

Максимальная абсолютная погрешность по вычислению скорости составляет 0,0095 ед.ч.Маха. Максимальная абсолютная погрешность по вычислению угла атаки составляет 0,687 градуса на 0,084 ед.ч.Маха, 0,584 градуса на 0,25 ед.ч.Маха и 0,292 градуса на 0,42 ед.ч.Маха. Максимальная абсолютная погрешность по вычислению угла скольжения составляет 0,545 градуса на 0,084 ед.ч.Маха, 0,537 градуса на 0,25 ед.ч.Маха и 0,458 градуса на 0,42 ед.ч.Маха. Результаты представлены для идеальной модели приемника, испытаний на влияние технологических погрешностей производства приемника на вычисление скорости и аэродинамических углов не проводилось.

В ближайших планах создание математической модели МВПД с камерой статики и обогревом, проведение аэродинамических и термодинамических исследований полного образца МПВД на разных скоростях потока воздуха и при разных аэродинамических углах. По результатам исследований будет определена оптимальная конструкция обогрева и будет уточнен расчет аэродинамических углов при помощи четырех измеренных местных давлений в боковых каналах измерения давления и давления, измеренного в канале статики.

Литература:

1. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. М.: ИПК Издательство стандартов, 1981. – 180 с.

2. ГОСТ 5212-74. Таблица аэродинамическая. Динамические давления и температуры торможения воздуха для скорости полета от 10 до 4000 км/ч. М.: Издательство стандартов, 1974. – 247 с.

3. Рабочая среда для имитационного моделирования Ansys. Режим доступа: <https://www.ansys.com/>

### **Research of a multifunctional air pressure probe**

<sup>1</sup>Rybakov S.V., <sup>2</sup>Sorokin M.Yu.

<sup>1</sup>UIMDB, <sup>2</sup>UISTU, Ulyanovsk, Russia

Multifunctional probes allow to measure such parameters as: total and static pressure, angles of attack and sideslip of the aircraft.

Previously, modifications of a multifunctional air pressure probe without a central hole for sensing total pressure were proposed, and a version of a hemispherical multifunctional air pressure probe of a smaller diameter (18 mm) with through holes was chosen for the research.

The research was carried out using mathematical modeling in the Ansys working environment, the problem of angles of attack and sideslip was performed by decomposing the velocity vector on an orthonormal basis, which allowed not to rearrange the grid for each experiment.

Preliminary researches of the probe model were carried out on the range of angles of attack and sideslip of 0...25 degrees with a step of 5 degrees at speeds of 0.084 Mach (100 km/h), 0.25 Mach (300 km/h) and 0.42 Mach (500 km/h).

Based on the results of the research, third- and fourth-order polynomials were compiled to calculate the air flow velocity and aerodynamic angles using four local measured pressures.

The maximum absolute inaccuracy in calculating the speed is 0.0095 Mach. The maximum absolute inaccuracy in calculating the angle of attack is 0.687 degrees per 0.084 Mach units, 0.584 degrees per 0.25 Mach, and 0.292 degrees per 0.42 Mach. The maximum absolute inaccuracy in calculating the sideslip angle is 0.545 degrees by 0.084 Mach, 0.537 degrees by 0.25 Mach, and 0.458 degrees by 0.42 Mach. The results are presented for an idealized model of the probe, tests for the influence of technological inaccuracy in the production of the probe on the calculation of speed and aerodynamic angles were not carried out.

In the near future, we plan to create a full-fledged mathematical model of the multifunctional air pressure probe with a static chamber and heating, to conduct aerodynamic and thermodynamic studies of a complete sample of the multifunctional air pressure probe at different air flow speeds and at different aerodynamic angles. Based on the results of the researches, the optimal design of the heating element to prevent icing will be determined and the calculation of aerodynamic angles will be refined using four measured local pressures in the four side pressure measurement ports and the pressure measured in the static port.

References:

1. GOST 4401-81. Standart atmosphere. Parameters M.: IPK Publishing House of standards, 1981. - 180 p.
2. GOST 5212-74. Table aerodynamic. Dynamic pressures and temperatures of braking air for flight velocity from 10 km/h to 4000 km/h M.: Publishing House of Standards, 1974. - 247 p.
3. Working environment for the Ansys simulation. Access mode: <https://www.ansys.com/>

### **Моделирование термоэлектрического датчика терагерцового излучения**

Сединин А.Д., Тукмакова А.С., Тхоржевский И.Л., Макарова Е.С., Новотельнова А.В.

ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

На диэлектрическую подложку наносится тонкий слой термоэлектрика методом вакуумного термического напыления. Для улучшения электромагнитного отклика плёнки на ней периодически вырезается узор из повторяющихся греческих крестов. Геометрические размеры структуры подобраны таким образом, чтобы обеспечивать максимальный отклик на частотах 0.1 и 0.14 ТГц. Структура нормально облучается гармоническим терагерцовым сигналом, мощностью 30 мВт. Под действием облучения структуре сообщается энергия, что приводит к её нагреву и возникновению в результате эффекта Зеебека термоЭДС.

Поставленную задачу сложно решить аналитическими методами. Поэтому для проведения моделирования необходимо использовать численные методы. В данной работе был выбран метод конечных элементов, реализуемый в программной среде Comsol.

Метод конечных элементов обладает рядом преимуществ, такими как: универсальность, простота физической интерпретации и алгоритмичность [1] Непрерывная величина аппроксимируется на каждом элементе полиномом или кусочно-заданной функцией, которые определяются с помощью узловых значений. Полиномы подбираются таким образом, чтобы непрерывность величины вдоль границы конечного элемента сохранялась.

Граничные условия для электромагнитных процессов в рамках данной задачи задавались при помощи портов, которые определяют входные и выходные точки облучения модели. Порты описывались мощностью облучения, частотой и формой излучаемой электромагнитной волны.

Свойства материалов, описывающих модель, были получены при помощи импульсной терагерцевой спектроскопии [2]

Геометрически свойства фильтра характеризуются периодом структуры ( $P$ ), шириной креста ( $W$ ), и длиной креста ( $L$ ). Для оценки эффективности структуры в качестве детектора электромагнитного излучения использовался один из параметров матрицы рассеяния  $S_{21}$ .

Моделируя изменение этого параметра в диапазоне 0.01 – 0.3 ТГц были подобраны геометрические размеры фильтра, демонстрирующие максимальное значение  $S_{21}$  на заявленных частотах 0.1 и 0.14 ТГц.

В результате моделирования облучения ТГц излучением были получены значения максимальной температуры в объеме пленки.

На рисунке отчетливо видно, что нагрев происходит в области верхней и нижней граней креста и составляет более 5 градусов, что достаточно для получения термоЭДС 100 мкВ. Полученная величина термоЭДС достаточна для детектирования терагерцового излучения.

Литература:

1. Андреев В.Б. Лекции по методу конечных элементов. 2nd ed. Москва: ООО “МАКС Пресс”, 2010.

2. Tukmakova A. [и др.] FEM Simulation of THz Detector Based on Sb and Bi88Sb12 Thermoelectric Thin Films // Applied Sciences , Vol. 10, No. 6, 2020.

### **Modelling of thermoelectric terahertz detector**

Sedinin A.D., Tukmakova A.S., Tkhorzhevskiy I.L., Makarova E.S., Novotelnova A.V.

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

A thin thermoelectric layer is deposited on a dielectric substrate by vacuum thermal spraying. To improve the electromagnetic response of the film, a pattern of repeating Greek crosses is periodically cut on it. The geometrical dimensions of the structure were selected in such a way as to provide the maximum response at frequencies of 0.1 and 0.14 THz. The structure is normally irradiated with a harmonic terahertz signal with a power of 30 mW. Under the action of irradiation, energy is imparted to the structure, which leads to its heating and the appearance of thermoEMF as a result of the Seebeck effect.

This task is difficult to solve within the framework of analytical methods. Therefore, to carry out modeling, it is necessary to use numerical methods. In this work, the finite element method implemented in the Comsol software environment was chosen.

The finite element method has a number of advantages, such as: versatility, simplicity of physical interpretation and algorithmicity [1] A continuous value is approximated at each element by a polynomial or piecewise given function, which are determined using nodal values. The polynomials are selected in such a way that the continuity of the quantity along the boundary of the finite element is preserved.

The boundary conditions for electromagnetic processes within the framework of this problem were set using ports that determine the input and output points of irradiation of the model. The ports were described by the irradiation power, frequency and shape of the emitted electromagnetic wave.

The properties of the materials describing the model were obtained using pulsed terahertz spectroscopy [2]

The geometric properties of the filter are characterized by the period of the structure ( $P$ ), the width of the cross ( $W$ ), and the length of the cross ( $L$ ). To evaluate the efficiency of the structure, one of the parameters of the scattering matrix  $S_{21}$  was used as an electromagnetic radiation detector.

By simulating the change in this parameter in the range of 0.01 - 0.3 THz, the geometric dimensions of the filter were selected, demonstrating the maximum value of  $S_{21}$  at the declared frequencies of 0.1 and 0.14 THz.

As a result of simulating the exposure to THz radiation, the values of the maximum temperature in the volume of the film were obtained.

The figure clearly shows that heating occurs in the area of the upper and lower edges of the cross and is more than 5 degrees, which is enough to obtain a thermoEMF of 100  $\mu$ V. The obtained value of thermoEMF is sufficient to detect terahertz radiation.

## Метод переключения регуляторов контуров САУ ГТД

Сторожев С.А., Южаков А.А.

ПНИПУ, г. Пермь, Россия

Рассматривается применение регулятора состояния применительно к авиационному газотурбинному двигателю (ГТД) [1-3]. ГТД характеризуется тремя переменными: частота вращения свободной турбины (вентилятор или компрессор низкого давления), частота вращения компрессора высокого давления и температура горения газа за камерой сгорания. Все переменные зависят от расхода топлива. В настоящее время перечисленные параметры регулируются с помощью отдельных независимых контуров и выбираются селектором в зависимости от режима, при этом возможен дребезг. Предлагается адаптивный регулятор состояния, а также оригинальный метод переключения штатного селектора и регулятора состояния с целью повышения качества управления ГТД.

В регуляторе состояния для каждого входа используется только одна треугольная функция принадлежности (терм), параметры которой задаются настройками регулятора состояния с учетом предыдущих состояний системы автоматического управления контурами газотурбинного двигателя. Функции принадлежности регулятора состояния смещаются вслед за входными переменными.

Штатный селектор выбирает контур для регулирования по минимальному или максимальному входу в блок переключения регуляторов.

Переключение регуляторов осуществляется с помощью алгоритма индикации установившегося режима. На вход данного блока подаются степени принадлежности с выхода фаззификатора регулятора состояния. Далее, происходит определение установившегося режима по нескольким последним входным значениям. Во время переходных процессов, протекающих в контурах САУ ГТД, работает регулятор состояния, а в установившемся режиме вступает в работу штатный селектор.

Выводы. Предложен метод адаптации при проектировании регулятора состояния подачи топлива в камеру сгорания ГТД. Регулятор состояния дополняет теорию нечетких систем, а алгоритм переключения регуляторов позволяет существенно повысить качество управления ГТД.

Литература:

1. Иноземцев, А.А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок.: учеб. / А.А. Иноземцев, А.А. Нихамкин, В. Л. Сандрацкий. // М.: Машиностроение, 2008, Т2. – 368 с.
2. Костюков В.М. Модель газотурбинного двигателя и его системы управления для особых значений углов атаки и метеорологических условий / В. М. Костюков, Н. И. Капырин. – Текст: электронный // Труды МАИ. – 2011. – №49. – URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=28075>.
3. Гуревич О.С. Управление авиационными газотурбинными двигателями. Учебное пособие – М: Изд-во МАИ, 2001. – 100 С.

### **The method of switching the circuit regulators of the automatic control system of the gas turbine engine**

Storozhev S.A., Yuzhakov A.A.

PNRPU, Perm, Russia

The application of the state regulator in relation to the aircraft gas turbine engine (GTE) is considered. The state of the GTE is characterized by three variables: the rotational speed of the free turbine (fan or low-pressure compressor), the rotational speed of the high-pressure compressor, and the temperature of gas combustion behind the combustion chamber. All variables are dependent on fuel consumption. Currently, the listed parameters are regulated using separate independent circuits and are selected by the selector depending on the mode, which is a disadvantage, since bounce is possible and there is no adaptation to changes in the external environment and object parameters. The paper proposes an adaptive state regulator, as well as an original method for switching the standard selector and state regulator in order to improve the quality of GTE control.

The design concept of the state regulator is such that, if there are several state regulator inputs, then only one triangular membership function (term) is used for each input, the parameters of which

are set by the state regulator settings taking into account the previous states of the automatic control system of the gas turbine engine circuits. The membership functions of the state controller are shifted following the input variables.

The standard selector selects the circuit for regulation at the minimum or maximum input to the controller switching unit.

The controllers are switched using the steady state indication algorithm. The degrees of membership from the output of the fuzzifier of the state regulator are fed to the input of this block. Further, there is a determination of the steady state according to the last several (the amount is set by the requirements for the accuracy of regulation) input values. During the transient processes occurring in the circuits of the automatic control system of the gas turbine engine, the state regulator works, and in the steady state, the standard selector comes into operation.

Conclusions. A new adaptation method is proposed when designing a regulator for the state of fuel supply to the combustion chamber of a gas-turbine engine. The state regulator complements the theory of fuzzy systems, and the regulator switching algorithm can significantly improve the quality of GTE control.

### **Проектирование САУ авиационных двигателей на основе модельно-ориентированного подхода**

Сулимова Д.А., Остапенко С.В.

АО «ОДК-СТАР», г. Пермь, Россия

Основными особенностями процессов проектирования САУ авиационных двигателей является сложность объектов управления, обеспечение требований к системам, критическим по безопасности, а также стоимость разработки.

Современной концепцией проектирования сложных систем является разработка на базе модельно-ориентированного подхода (МОП). Реализация МОП позволяет повысить качество разработки, снизить затраты на испытания и внедрение систем, сделать качественный шаг в сторону цифровизации разработки и построению Цифрового двойника системы.

Модельно-ориентированный подход должен сопровождать все стадии ЖЦ: модельно-ориентированное проектирование, управление и эксплуатация.

Модельно-ориентированное проектирование САУ основано на создании и постоянном уточнении математической модели (ММ) системы, включающей объект управления, гидромеханические и электронные агрегаты, а также встраиваемое бортовое ПО. Задачей МОП является выполнение расчетов и имитационного моделирования работы системы, подтверждающих выполнение предъявленных тактико-технических требований, синтез регуляторов и отработку алгоритмов управления в замкнутом контуре с моделью объекта управления.

Ключевым требованием к ММ агрегатов системы является их исполнение, непосредственно участвующее в производстве. Для гидромеханических агрегатов это не просто САД-модель, а адекватная расчетная модель, соответствующая реальному объекту, обеспечивающая с заданной точностью соответствие результатов расчета физическому процессу.

Для программного обеспечения строится модель ПО – исполняемая спецификация, из которой непосредственно генерируется исходный код бортового ПО.

Адекватные модели должны интегрироваться на базе единой платформы для реализации системного междисциплинарного 1D моделирования, что является необходимым условием для обеспечения применения технологии Цифровой двойник.

Многодисциплинарные исполняемые, интегрированные в единую систему, модели представляют собой результат сквозного проектирования и позволяют выполнять не только доводку и оптимизацию будущей системы, но и проводить испытания, в т.ч. в ненормальных условиях.

Суть модельно-ориентированного управления - применение в алгоритмах управления виртуальных датчиков и встроенной ММ двигателя, предназначенной для управления по неизменяемым, по модельным параметрам в условиях отказавших датчиков, а также с учетом изменения эксплуатационных свойств объекта управления во времени.

Управление с применением встроенных ММ повышает качество управления и живучесть двигателя в изменяющихся условиях.

Применение бортовых математических моделей необходимо для обеспечения требований по экологии (эмиссии, генерации шумов), экономике (топливной эффективности, стоимости ЖЦ), надежности, безопасности, управлению с отложенными отказами и для повышения лётной годности ЛА.

Модельно-ориентированная эксплуатация – подход, основанный на применении Цифрового двойника конкретного объекта, постоянно идентифицируемого с помощью зарегистрированных данных с датчиков и информационных каналов натурального объекта.

Такая модель, имеющая историю своего изменения во времени, может быть применена для предиктивной аналитики и определения будущего состояния объекта в различных условиях. Целью модельно-ориентированной эксплуатации является определение предотказного состояния системы, сопровождение эксплуатации системы в ситуации отложенного отказа.

### **Model-based designing aviation engine's control systems**

Sulimova D.A., Ostapenko S.V.

JSC “UEC-STAR”, Perm, Russia

The main features of the design processes for ACS of aircraft engines are the complexity of control objects, the provision of requirements for systems critical to safety, as well as the cost of development.

The modern concept for the design of complex systems is development based on a Model-Based Design (MBD). The implementation of the MBD allows to improve the quality of development, reduce the costs of testing and implementation of systems, make a qualitative step towards the digitalization of development and build a Digital Twin of the system.

A model-based approach should accompany all stages of the life cycle: model-based design, management and operation.

Model-based design of ACS is based on the creation and constant refinement of the mathematical model (MM) of the system, including the control object, hydromechanical and electronic units, as well as embedded on-board software. The task of the MBD is to perform calculations and simulation of the system operation, confirming the fulfillment of the presented tactical and technical requirements, the synthesis of controllers and the development of control algorithms in a closed loop with a model of the control object.

The key requirement for MM system units is their execution, which is directly involved in production. For hydromechanical units, this is not just a CAD model, but an adequate computational model corresponding to a real object, which ensures the correspondence of the calculation results to the physical process with a given accuracy.

For software, a software model is built – an executable specification, from which the source code of the onboard software is directly generated.

Adequate models should be integrated on the basis of a single platform for the implementation of systemic multidisciplinary 1D modeling, which is a prerequisite for ensuring the use of the Digital Twin technology.

Multidisciplinary executable models integrated into a single system are the result of end-to-end design and allow not only fine-tuning and optimization of the future system, but also testing, incl. in abnormal conditions.

The essence of model-based control is the use of virtual sensors and built-in MM of the engine in control algorithms, intended for control by unmeasured, by model parameters in conditions of failed sensors, as well as taking into account the change in the operational properties of the control object over time.

Management with the use of built-in MM improves the quality of control and survivability of the engine in changing conditions.

The use of onboard mathematical models is necessary to meet the requirements for ecology (emissions, noise generation), economics (fuel efficiency, life cycle cost), reliability, safety, management with delayed failures and to improve the airworthiness of aircraft.

Model-based exploitation is an approach based on the use of a digital twin of a specific object, constantly identified using recorded data from sensors and information channels of a natural object.

Such a model, which has a history of its change in time, can be used for predictive analytics and determining the future state of an object in various conditions. The purpose of model-based operation is to determine the pre-failure state of the system, to support the operation of the system in a situation of delayed failure.

### **Влияние конструкции лабиринтного уплотнения на параметры эффективности осевого компрессора и турбины**

Шипунов В.В., Виноградов А.С., Беденко К.А.

Самарский университет, г. Самара, Россия

Высокая эффективность авиационного двигателя особенно важна для обеспечения конкурентоспособности. Повышение общей эффективности может быть достигнуто за счет повышения уровня эффективности отдельных компонентов двигателя и отдельных элементов. К таким элементам можно отнести уплотнения проточной части. В большинстве публикаций, посвященных исследованиям уплотнений в авиационных двигателях, уплотнения рассматриваются как отдельный объект. В качестве входных данных для процесса проектирования указываются только физические параметры. Однако существует определенная взаимосвязь между конструкцией уплотнения и параметрами ступени. Для более детальной и точной конструкции уплотнение необходимо проектировать как отдельно, так и в составе лопаточной машины. Стоит отметить, что уплотнение не считается традиционным способом. Обычно исследуются только классические типы уплотнений. Это лабиринтные, щеточные, торцевые уплотнения и другие. Однако в авиационных двигателях примеры использования только одного единственного уплотнения редки. В прodelанной работе исследуется система уплотнения. Эта система состоит из двух кольцевых уплотнений, двух полостей между уплотнениями и лабиринтного уплотнения как для компрессора, так и для турбины. Для решения этой проблемы была создана трехмерная расчетная модель. Также были исследованы варианты с одной, двумя и тремя ступенями компрессора, а также для турбины низкого давления. Это исследование необходимо для объяснения влияния одного уплотнения не только на одну ступень, но и на весь компрессор или турбину. В результате исследования было определено влияние величины утечки через уплотнение на уровень КПД компрессоров и турбин. При этом учитывались также расчеты потерь на вихреобразование и нагрев воздуха от вращения. Кроме того, было исследовано влияние других конструктивных параметров уплотнения. Этими параметрами являются размер зазора, расположение уплотнения, производственные допуски, количество зубьев и их форма, режимы потока и геометрические параметры притрактовых полостей.

Правильность выводов подтверждена сравнением с экспериментальными данными. Для создания расчетных моделей использовались реальные профили лопаток. Сравнение проводилось с актуальными характеристиками компрессора, полученными в ходе его официальных испытаний. В результате сравнения была получена приемлемая разница между расчетными и экспериментальными результатами.

### **Labyrinth seal construction influence on effectiveness of axial compressor and turbine**

Shipunov V.V., Vinogradov A.S., Bedenko K.A.

Samara University, Samara, Russia

This High efficiency of an aircraft engine is particularly important for ensuring competitiveness. Improving overall efficiency can be achieved by increasing the level of efficiency of individual engine components and individual elements. Flow path seals can be considered as such elements. In the article, the effect of tightness of the flow path seal in the stage on the efficiency is considered. Most publications on research devoted to the seals in aircraft engines study the seals as a separate object. Only physical parameters are specified as input data for the design process. However, the certain relationship exists between the seal design and the stage parameters. For a more detailed and precise design, the seal must be designed both as separately and as part of the blade machine. The second point is that sealing is not considered in the traditional way. Usually, only classical types of seals are investigated. These are labyrinth, brush, face contact seals and others. However, in aircraft engines, the examples of using only one singular seal are rare. In this article, the sealing system is investigated. This system consists of two rim seals, two inter-seal cavities, and a labyrinth seal.

To solve this problem, a three-dimensional calculation model together with a three-dimensional stage model were created. The variants with one, two, and three stages that are working together were also investigated. This study is necessary to explain the impact of a single seal not only on one stage but also on the entire compressor. This study was based on the design of an axial compressor with relatively low parameters. In modern compressors with high values of the total compression ratio, this effect will be much higher. It means that the results of the investigation can be used in the overall range of modern gas turbine machines. As a result of the study, the influence of the leakage value through the seal on the level of efficiency of one stage and a group of stages was determined. Whereas the calculating of the losses due to the vortex formation and air heating from rotation were also taken into account. In addition, the influence of other design parameters of the seal has been investigated. These parameters are the size of the gap, the radius of the seal position, the manufacturing tolerances, the number of pins, and their shape, the flow modes, and the geometric parameters of the interstitial cavities.

The correctness of the conclusions was confirmed by comparison with the experimental data. The actual profiles of the compressor blades were used for the creating of the calculation models. The comparison was performed with the actual outflow characteristics of the compressor, which was obtained during its official tests. As a result of the comparison, an acceptable difference was obtained between the calculated and experimental results.

## Алфавитный указатель

### А

Абгарян Г.В. 31  
Александров А.С. 49  
Алиева Д.А. 89

### Б

Бабиченко А.В. 29  
Балакин Д.А. 55  
Балакирева Н.В. 42  
Башаров Е.А. 90  
Беденко К.А. 32, 120  
Беднаж В.А. 61  
Беклемищев Ф.С. 91  
Белюсов А.В. 111  
Бирюков П.А. 26  
Блинов Ю.И. 86  
Больших А.А. 39  
Борисов А.В. 16  
Бочканов Ф.Ю. 27  
Брехов О.М. 64  
Брызгалов А.И. 33, 93 Булавская  
А.А. 14  
Бунтов М.Ю. 12

### В

Вальков А.Ю. 18  
Василевский Д.О. 13  
Васильев А.Н. 102 Васильевский  
С.А. 33,  
93  
Виноградов А.С. 32,  
120  
Вириясова А.Ю. 65

### Г

Гайдаров Д.Д. 35  
Гарибян Б.А. 94  
Гарипов И.Р. 36  
Голдобин Н.Н. 56  
Гомозов О.А. 64  
Горячев В.Д. 43  
Гребенюк Е.И. 49  
Грибиненко Д.В. 38  
Грибков И.Н. 96  
Григорьев Б.С. 41  
Григорьева А.А. 14, 109  
Гришанцева Л.А. 16  
Губайдуллин И.Р. 65  
Гунчин В.К. 39

### Д

Даршт Я.А. 112  
Дегтяренко Р.А. 94  
Дембицкий Н.Л. 58

Дымников В.П. 47

### Е

Елисеев А.А. 41  
Емельянов А.А. 16  
Еремеев В.О. 42  
Ерешко М.В. 16  
Ерков А.П. 90

### Ж

Жаворонков Ю.А. 18  
Жарков Е.О. 36  
Желаннов С.А. 64  
Жеребцов А.А. 36  
Жуковская К.И. 16

### З

Завьялова Н.А. 51  
Загидуллин Р.С. 59  
Задорина Н.А. 98  
Звонарев С.Л. 100  
Зленко А.А. 87  
Зубко А.А. 100  
Зубко А.И. 100

### И

Иванова Н.А. 61  
Игнаткин Ю.М. 12  
Илющенко В.В. 62

### К

Карпенков Д.Ю. 27  
Касатиков Н.Н. 64  
Качанов Б.Я. 86  
Кашин Н.Н. 50  
Квашнин Д.Ю. 19  
Керский Е.В. 55  
Климов Д.И. 65  
Ковалев И.А. 19  
Колесников А.Ф. 33, 93  
Колпаков А.М. 39  
Кошелев П.А. 86  
Кошечев В.П. 101  
Кубанских О.В. 61  
Кузнецов А.А. 51  
Кузнецов Е.Б. 102  
Кузьмин В.Л. 18  
Кукин Н.С. 62  
Кулямин Д.В. 47

### Л

Латыпова Д.С. 21  
Леонов С.С. 102  
Лобанов А.В. 70

Лупуляк С.В. 41

### М

Мазев А.С. 22  
Макарова Е.С. 115  
Макеев П.В. 12  
Максимов Ф.А. 46  
Малашкин А.В. 104  
Мамедов Т.Т. 65  
Маркова Е.В. 105  
Матковский Н.О. 106  
Мацера М.С. 26  
Милойчикова И.А. 14  
Мингалев С.В. 108  
Михайлов С.В. 45  
Михальченко Е.В. 43  
Могильная Т.Ю. 49  
Молотков А.А. 24  
Молчанов А.М. 38  
Мосин В.Г. 66  
Мячочин А.С. 38

### Н

Наборщиков А.А. 67  
Нгуен Нгок Шанг 45  
Нгуен Туан Ань 109  
Негодяев С.С. 51  
Нежметдинов Р.А. 19  
Непомилуев В.В. 98  
Нигматуллин В.О. 46  
Никитин А.К. 62  
Никитин В.Ф. 43  
Новотельнова А.В. 27,  
115

### О

Осин А.А. 78 Останин  
П.А. 47 Остапенко  
С.В. 68, 118

### П

Пагава Л.Л. 49  
Пантелеев А.В. 70  
Петелин Н.А. 49  
Погорелов А.В. 111  
Правило М.Н. 26  
Пузанов А.В. 72, 112

### Р

Родионов Н.В. 59  
Романова Д.И. 25  
Рыбакин Б.П. 43  
Рыбаков С.В. 114

**С**

Сальников А.В. 73, 75  
Самойленко Н.А. 50  
Саяхов И.Ф. 36  
Сединин А.Д. 115  
Сивакова Т.В. 81  
Сологуб Г.Б. 76, 77, 78  
Сорокин М.Ю. 114  
Соцков И.А. 35  
Стамов Л.И. 43  
Сторожев С.А. 117  
Стрижак С.В. 25  
Стрижак Сергей 79  
Стучебров С.Г. 14, 109  
Суворов А.С. 42  
Судаков В.А. 81, 83  
Сулимова Д.А. 118

**Т**

Тархов Д.А. 102  
Тимофеева А.А. 76  
Тищенко Д.Ю. 26

Третьякова О.Н. 24  
Тукмакова А.С. 27, 115  
Тумаков Д.Н. 21  
Тхоржевский И.Л. 115

**У**

Ульянов С.В. 18

**Ф**

Февральских А.В. 39  
Финогенов Н.А. 77  
Фомин В.Е. 27  
Формалев В.Ф. 94  
Фукин И.И. 51

**Х**

Худяков Д.С. 108

**Ц**

Цибин А.В. 64

**Ч**

Черепенников Ю.М.  
109  
Чернышов Н.Н. 111  
Чжан Е.А. 84

**Ш**

Шапошников В.А. 42  
Шарунов А.В. 53  
Шевадронов А.С. 29  
Шиндер Ю.К. 41  
Шипунов В.В. 32, 120  
Штанов Ю.Н. 101

**Ю**

Южаков А.А. 67, 68,  
117

**Я**

Якуш С.Е. 33, 93  
Янышев Д.С. 38

## Index

### A

Abgaryan G.V. 31  
Alexandrov N.A. 49  
Alieva D.A. 89

### B

Babichenko A.V. 30  
Balakin D.A. 55  
Balakireva N.V. 42  
Basharov E.A. 91  
Bedenko K.A. 33, 120  
Bednazh V.A. 62  
Beklemishchev F.S. 92  
Belousov A.V. 111  
Biryukov P.A. 27  
Blinov K.Yu. 86  
Blinov Yu.I. 86  
Bochkanov F.Y. 28  
Bolshikh A.A. 40  
Borisov A.V. 17  
Brekhov O.M. 64  
Bryzgalov A.I. 34, 94  
Bulavskaya A.A. 15  
Buntov M.Y. 13

### C

Cherepennikov Y.M. 110  
Chernyshov N.N. 111  
Chzhan E.A. 85  
Cibin A.V. 64

### D

Darsht Ya.A. 113  
Degtyarenko R.A. 95  
Dembitsky N.L. 59  
Dymnikov V.P. 48

### E

Eliseev A.A. 41  
Emelyanov A.A. 17  
Eremeev V.O. 42  
Ershko M.V. 17  
Erkov A.P. 91

### F

Fevralskikh A.V. 40  
Finogenov N.A. 78  
Fomin V.E. 28  
Formalev V.F. 95  
Fukin I.I. 52

### G

Garibyan B.A. 95

Garipov I.R. 37  
Gaydarov D.D. 36  
Goldobin N.N. 57  
Gomozov O.A. 64  
Goryachev V.D. 44  
Grebenyuk E.I. 49  
Gribinenko D.V. 39  
Gribkov I.N. 97  
Grigor'ev B.S. 41  
Grigorieva A.A. 15, 110  
Grishantseva L.A. 17  
Gubaidullin I.R. 66  
Gunchin V.K. 40

### I

Ignatkin Yu.M. 13  
Ilyushchenko V.V. 63  
Ivanova N.A. 62

### J

Jelannov S.A. 64  
Jukovskaya K.I. 17

### K

Kachanov B.Ya. 86  
Karpenov D.Y. 28  
Kasatikov N.N. 64  
Kashin N.N. 51  
Kersky E.V. 55  
Khudyakov D.S. 108  
Klimov D.I. 66  
Kolesnikov A.F. 34, 94  
Kolpakov A.M. 40  
Koshcheev V.P. 102  
Koshelev P.A. 86  
Kovalev I.A. 20  
Kubanskikh O.V. 62  
Kukin N.S. 63  
Kulyamin D.V. 48  
Kuzmin V.L. 18  
Kuznetsov A.A. 52  
Kuznetsov E.B. 103  
Kvashnin D.Y. 20

### L

Latypova D.S. 22  
Leonov S.S. 103  
Lobanov A.V. 71  
Lupuleac S.V. 41

### M

Makarova E.S. 116  
Makeev P.V. 13

Maksimov F.A. 47  
Malashkin A.V. 105  
Mamedov T.T. 66  
Markova E.V. 106  
Matkovskiy N.O. 107  
Matsera M.S. 27  
Mazaev A.S. 23  
Mikhailov S.V. 45  
Mikhalchenko E.V. 44  
Miloichikova I.A. 15  
Mingalev S.V. 108  
Mogilnaya T.Yu. 49  
Molchanov A.M. 39  
Molotov A.A. 24  
Mosin V.G. 67  
Myakochin A.S. 39

### N

Naborshchikov A.A. 88  
Negodiaev S.S. 52  
Nepomiluyev V.V. 99  
Nezhmetdinov R.A. 20  
Nguyen Ngoc Sang 45  
Nguyen Tuan Anh 110  
Nigmatullin V.O. 47  
Nikitin A.K. 63  
Nikitin V.F. 44  
Novotelnova A.V. 28, 116

### O

Osin A.A. 79  
Ostanin P.A. 48  
Ostapenko S.V. 69, 119

### P

Pagava L.L. 49  
Pantelev A.V. 71  
Petelin N.A. 49  
Pogorelov A.V. 111  
Pravidlo M.N. 27  
Puzanov A.V. 73, 113

### R

Rodionov N.V. 60  
Romanova D.I. 25  
Rybakin B.P. 44  
Rybakov S.V. 114

### S

Salnikov A.V. 74, 75  
Samoylenko N.A. 51  
Sayahov I.F. 37  
Sedinin A.D. 116

Shaposhnikov V.A. 42  
Sharunov A.V. 54  
Shevadronov A.S. 30  
Shinder J.K. 41  
Shipunov V.V. 33, 120  
Shtanov Yu.N. 102  
Sivakova T.V. 82  
Sologub G.B. 77, 78, 79  
Sorokin M.Yu. 114  
Sotskov I.A. 36  
Stamov L.I. 44  
Storozhev S.A. 117  
Strijhak S.V. 25, 80  
Stuchebrov S.G. 15, 110  
Sudakov V.A. 82, 83  
Sulimova D.A. 119  
Suvorov A.S. 42  
**T**  
Tarkhov D.A. 103

Timofeeva A.A. 77  
Tishchenko D.Y. 27  
Tkhorzhevskiy I.L. 116  
Tretiyakova O.N. 24  
Tukmajova A.S. 28  
Tukmakova A.S. 116  
Tumakov D.N. 22

**U**  
Ul'yanov S.V. 18

**V**  
Valkov A.Y. 18  
Vasilevski S.A. 34  
Vasilevskiy D.O. 14  
Vasilievskii S.A. 94  
Vasilyev A.N. 103  
Vinogradov A.S. 33, 120

Viryasova A.U. 66

**Y**  
Yakush S.E. 34, 94  
Yanyshhev D.S. 39  
Yuzhakov A.A. 68, 69,  
117

**Z**  
Zadorina N.A. 99  
Zagidullin R.S. 60  
Zavialova N.A. 52  
Zharkov E.O. 37  
Zavoronkov Y.A. 18  
Zherebtsov A.A. 37  
Zlenko A.A. 88  
Zubko A.A. 101  
Zubko A.I. 101  
Zvonarev S.L. 101

**II Международная конференция  
«Математическое моделирование»  
Тезисы**

**II International Conference  
“Mathematical Modelling”  
(AviaSpace-2021)  
Abstracts**



Издательство «Перо»  
109052, Москва, Нижегородская ул., д. 29-33, стр. 15, ком. 536  
Тел.: +7 495 973-72-28, 665-34-36  
Подписано к использованию 02.08.2021.  
Объём 1,54 Мбайт. Электрон. текстовые данные. Заказ 666.

ОРГАНИЗАТОР  
ORGANIZER



КОНТАКТЫ  
CONTACTS

125992, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

Volokolamskoe shosse, 4, Moscow, 125993

[aviacosmos@gmail.com](mailto:aviacosmos@gmail.com)

[math.mai.ru](http://math.mai.ru)