

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Новосибирский государственный технический университет

Сибирское отделение Российской академии наук

Академия Военных Наук

Российская академия ракетных и артиллерийских наук

Межрегиональная ассоциация «Сибирское Соглашение»

Федеральное государственное казенное военное образовательное  
учреждение высшего образования

Новосибирское высшее военное командное училище

## **НАУКА ПРОМЫШЛЕННОСТЬ ОБОРОНА**

### **ТРУДЫ**

**XXI ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ  
КОНФЕРЕНЦИИ**

**ПОСВЯЩЕННОЙ 75-ЛЕТИЮ ПОБЕДЫ  
В ВЕЛИКОЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ВОЙНЕ**

г. Новосибирск, 7-9 октября 2020 г.

Том I

### ***СЕКЦИИ:***

*САМОЛЕТО-И ВЕРТОЛЕТОСТРОЕНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ  
И ДВИГАТЕЛЕЙ*

*ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ МАШИН*

*ГИДРОАЭРОДИНАМИКА*

*ТЕХНИКА И ФИЗИКА НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР. СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ И  
ЗАЩИТЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ*

Новосибирск

2020

УДК 62+623](063)

ББК 72я431

Н 34

Великая Отечественная война закончилась 75 лет назад. Эта война изменила ход мировой истории, судьбы людей и карту мира. Наш народ противостоял мощному натиску высокоорганизованного и хорошо вооружённого противника — нацистской Германии и её союзников. Мы выстояли и победили.

**Н 34 Наука Промышленность Оборона:** труды XXI Всероссийской научно-технической конференции: в 4 т. / коллектив авторов; под редакцией С.Д. Саленко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020.

ISBN 978-5-7782-4259-3

Том 1: - 180 с.

ISBN 978-5-7782-4260-9

*Редакторы тома:*

**Гостеев Ю.А.**, к.ф.-м.н., доцент (гидроаэродинамика)

**Горбачев М.В.**, к.т.н., доцент (техника и физика низких температур. системы жизнеобеспечения и защиты ЛА)

**Курлаев Н.В.**, д.т.н., профессор (самолето- и вертолетостроение и эксплуатация летательных аппаратов и двигателей)

**Красноручкий Д.А.**, к.т.н., доцент (динамика и прочность машин)

**Обуховский А.Д.**, к.т.н., доцент (гидроаэродинамика)

**Расторгуев Г.И.**, д.т.н., профессор (динамика и прочность машин)

**Рынгач Н.А.**, к.т.н., доцент (самолето- и вертолетостроение и эксплуатация летательных аппаратов и двигателей)

Представлены труды XXI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов «Наука Промышленность Оборона – 2020». Материалы представлены по следующим секциям:

- *самолето- и вертолетостроение и эксплуатация летательных аппаратов и двигателей;*
- *динамика и прочность машин;*
- *гидроаэродинамика.*
- *техника и физика низких температур. системы жизнеобеспечения и защиты летательных аппаратов.*

**УДК 62+623](063)**

ISBN 978-5-7782-4260-9 (Том 1)

ISBN 978-5-7782-4259-3

© Коллектив авторов, 2020

© Новосибирский государственный  
технический университет, 2020

## СОСТАВ ОРГКОМИТЕТА

### **Председатель оргкомитета:**

*Пустовой Н.В.*, д.т.н., профессор, председатель совета ректоров Сибирского Федерального округа, президент Новосибирского государственного технического университета (НГТУ).

### **Сопредседатели:**

*Диканский Н.С.*, академик РАН, советник РАН, профессор, д.ф.-м.н.;

*Заболотный П.В.*, генеральный директор АО «НПО НИИИП-НЗиК»;

*Серьезнов А.Н.*, д.т.н., профессор, научный руководитель ФГУП «СибНИА им. С. А. Чаплыгина»;

*Панасенко С.Н.*, заместитель Генерального директора ПАО "Компания "Сухой", директор НАЗ им. В.П. Чкалова;

*Фомин В.М.*, академик РАН, профессор, д.ф.-м.н., научный руководитель Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН (ИТПМ СО РАН);

*Марковчин С. Г.*, полковник, начальник Новосибирского Высшего Военного Командного училища;

*Эдвабник В.Г.*, к.т.н., д.э.н., член-корреспондент РАН, зав. кафедрой АИУС, зам. генерального директора по развитию ОАО Научно исследовательский институт электронных приборов (НИИЭП).

*Хмельников Е.А.*, д.т.н., профессор Нижнетагильского технологического института (филиала) Уральского федерального университета имени первого президента России Б.Н. Ельцина, ученый секретарь РУСЦ РАН, член-корреспондент РАН, действительный член АВН,

*Терехов В.И.* д.т.н., профессор кафедры Технической теплофизики (ТТФ), ведущий научный сотрудник лаб. Термогазодинамики Института теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе.

### **Члены Оргкомитета:**

*Атапин В.Г.*, д.т.н., профессор, кафедра «Прочности летательных аппаратов» (ПЛА) НГТУ;

*Балаганский И.А.*, д.т.н., профессор, кафедра «Газодинамических импульсных устройств» (ГДУ) НГТУ;

*Гуськов А.В.*, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Газодинамических импульсных устройств» (ГДУ) НГТУ – ответственный секретарь, действительный член Академия военных наук АВН;

*Горбачев М.В.*, к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Технической теплофизики» (ТТФ) НГТУ;

*Дьяченко Ю.В.*, д.т.н., профессор, кафедра «Технической теплофизики» (ТТФ) НГТУ;

*Киселёв А.В.*, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Радиоприемных и радиопередающих устройств» (РПиРПУ) НГТУ;

*Коробейников С.М.*, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Безопасности труда» (БТ) НГТУ;

*Костин В.В.*, президент ООО «Авиатехснаб»;

*Курлаев Н.В.*, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Самолето- и вертолетостроения» (СиВС) НГТУ;

*Ларичкин В.В.*, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Инженерных проблемы экологии» (ИПЭ) НГТУ;

*Легкий В.Н.*, д.т.н., доцент, кафедра «Автономных информационных и управляющих систем» (АИУС) НГТУ;

*Литвинцева Г.П.*, д.э.н., профессор, заведующая кафедрой «Экономической теории и прикладной экономики» (ЭТПЭ) НГТУ;

*Милевский К.Е.*, к.т.н., доцент, кафедра ГДУ НГТУ, член-корреспондент АВН;

*Немировский Ю.В.*, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник ИТПМ СО РАН, действительный член АВН;

*Обуховский А.Д.*, к.т.н., доцент, заместитель заведующего кафедрой «Аэрогидродинамики» (АГД) НГТУ;

*Поляков С.А.*, к.ю.н., доцент, заведующий кафедрой «Правоведения» (Правоведения) НГТУ;

*Подружин Е.Г.* д.т.н. профессор, кафедра «Прочности летательных аппаратов» (ПЛА) НГТУ;

*Расторгуев Г.И.*, д.т.н., профессор, кафедра «Прочности летательных аппаратов» (ПЛА);

*Рынгач Н. А.*, к.т.н., доцент, кафедра «Самолето- и вертолетостроения» (СиВС) НГТУ.

*Саленко С.Д.*, д.т.н., профессор, декан факультета летательных аппаратов НГТУ, заведующий кафедрой «Аэрогидродинамики» (АГД) НГТУ;

*Санков О.В.*, ст. преподаватель, зам. зав. кафедрой «Автономных информационных и управляющих систем» (АИУС) НГТУ;

*Чичиндаев А.В.*, д.т.н., профессор, кафедра «Технической теплофизики» (ТТФ) НГТУ;

# **СЕКЦИЯ: САМОЛЁТО- И ВЕРТОЛЁТОСТРОЕНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ДВИГАТЕЛЕЙ**

УДК 533.6.015

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАКОНЦОВОК КРЫЛА САМОЛЁТА**

*Бондаренко Кристина Павловна, Давыдова Евгения Владимировна,  
Сапожникова Виктория Дмитриевна, Нарышева Галина Геннадьевна*  
Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия,  
г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

*Бондаренко К. П., e-mail: kristina.bondarenko.99@gmail.com*

**Аннотация.** В статье идет речь о видах законцовок крыла самолета и анализ их эффективности.

**Ключевые слова:** самолёт, законцовки крыла, индуктивное сопротивление, топливная эффективность, винглет, удлинение крыла

### **1. Введение**

На самолёт во время полёта действуют несколько сопротивлений, одно из них – индуктивное. Во время полёта подъёмная сила образуется из-за разности давления над крылом и под ним. Перетекание воздуха снизу вверх осуществляется только на конце крыла, образуя вихрь. Часть этого вихря снижает подъёмную силу крыла, делая крыло неэффективным, в связи с чем происходят большие затраты на топливо. Одним из решений уменьшения этого сопротивления является установка на самолетах законцовок.

### **2. Законцовки крыла**

Законцовки крыла (концевые крылышки, или винглеты, от англ. winglet) — это надстройки на концах крыльев летательных аппаратов, имеющие вид крылышек или плоских шайб. Основной причиной установки винглетов является повышение эффективности сжигания топлива на крейсерских режимах самолёта. [1]

Жизнеспособность установки винглетов различна для каждой конфигурации самолета, и для достижения надлежащего баланса между аэродинамической эффективностью и экономичностью веса требуются сложные исследования конструкции. При выборе оптимальной конфигурации крылышка учитывается множество параметров конструкции, в том числе размах крыла, площадь, развертка, конусность, угол наклона, скручивание, толщина, практический потолок и т.д.

### **3. Виды законцовок крыла и их особенности**

**Крылышко Уиткомба** (или шайба Уиткомба). В 70-х годах инженер NASA Ричард Уиткомб разработал и провел исследования законцовки, которая сейчас называется крылышко Уиткомба (или шайба Уиткомба).

Толчком к разработке послужил топливный кризис в 1973 году. Шайба представляет из себя поверхность, распространяющуюся перпендикулярно крылу вверх и вниз. Такие законцовки крыла дают около 1,5% экономии топлива[1-2].

**Винглет** (англ. winglet «крылышко»). Впервые на современном пассажирском лайнере законцовка крыла в виде винглета была установлена на Boeing-747-400 в 1985 году. В переводе на английский их называют «Wingtip fence». С их помощью уменьшается вредное перетекание на крыле, эффективное удлинение крыла увеличивается, при этом практически не увеличивая размах [1,3]. Это позволяет уменьшить величину индуктивного сопротивления (снизить интенсивность вихревых жгутов) и, соответственно, ощутимо увеличить экономичность и дальность. Вихри как бы перемещаются на концы «крылышек» и становятся значительно меньше. Впервые установив такие винглеты на самолеты, было получено увеличение дальности до 6,5%. В 1991 году фирма Aviation Partners Inc.(API) и ее главный специалист по аэродинамике Луи Гратцер разработал «Blended winglet». Такая законцовка крыла представляет собой крылышко, в которое плавно переходит крыло, загибаясь вверх по дуге большого радиуса, и имеет большое удлинение. Экономия топлива при данной конструкции составляет до 7%.

**Split scimitar winglet (SSW)**. В 2014 году на самолёты Boeing 737 начали устанавливать, по желанию авиакомпании, раздвоенные винглеты под названием «split-scimitar». SSW позволяют сократить расход топлива на 1,6% при прочих равных условиях и уменьшают на 530 тонн выброс CO<sub>2</sub> в атмосферу с одного ВС в год.

**Шарклеты** (англ. sharklets «акулы плавники»). В конце 2011 года Airbus занялся разработками законцовок для семейства самолетов A320 [1]. Было принято решение об установке шарклетов на все самолеты семейства A320NEO, а также на машины, находящиеся в эксплуатации. Они были призваны обеспечить экономию топлива за счёт уменьшения завихрений воздуха порядка 6-9% на маршрутах большой протяженности.

**Гребневые законцовки** (англ. raked wingtips). Законцовки этого типа представляют собой горизонтальные «крылышки» с большой стреловидностью (больше, чем у основного крыла) [2]. В данном случае ставка сделана на эффективное увеличение удлинения крыла и за счет этого уменьшение интенсивности вихревых шнуров. В основном их устанавливают на лайнеры большой протяженности полета. Считается, что гребневые законцовки дают уменьшение индуктивного сопротивления крыла на 5,5%.

#### **4. Анализ эффективности законцовок крыла на ближнемагистральных рейсах.**

Как известно, законцовки крыла в наше время устанавливаются на самолетах любой протяженности полета, будь то региональные самолеты, бизнесджеты или широкофюзеляжные дальнемагистральные лайнеры. Разные

виды законцовок на различных лайнерах ведут себя по-разному, установка одних может увеличить топливную эффективность на 5%, а другие лишь на 1,5-2%. Ниже в таблицах будут представлены результаты установки законцовок разных видов на ближне-, дальне-, и среднемагистральные самолеты, а также на самолеты бизнес авиации [3].

Рассмотрим серию реактивных административных самолетов бизнес класса компании Learjet. Идея установить законцовки в виде винглетов на новую модель самолета пришла им еще в 70-ых годах. Эти самолеты стали первыми коммерческими самолетами в мире, на которых были использованы винглеты.

Летно-технические характеристики:

Таблица 1. Сравнение летно-технических характеристики Learjet

Характеристика	Learjet 25	Learjet 28
Размах крыла, м	10,84	13,35
Площадь крыла, м <sup>2</sup>	21,53	24,57
Практический потолок, м	13715	15545
Практическая дальность, м	2853	2100
Крейсерская скорость, км/ч	859	756

Таблица 2. Анализ топливной эффективности Learjet

Базовая модель	Модель, оснащенная законцовками	Тип устанавливаемых законцовок	Топливная эффективность
Learjet 25	Learjet 28	Винглеты	↑ 6,5%

Впервые на пассажирском лайнере законцовки в виде винглетов были установлены в 1985 на Boeing 747-400 – дальнемагистральный двухпалубный широкофюзеляжный самолет. Данная разновидность винглетов получила название «wingtip fence» [4].

Таблица 3. Сравнение летно-технических хар-ик Boeing 747

Характеристика	Boeing 747-300	Boeing 747-400
Размах крыла, м	59,64	64,4
Площадь крыла, м <sup>2</sup>	510,92	541
Практический потолок, м	13750	10700
Практическая дальность, м	12400	14815
Крейсерская скорость, км/ч	907	988

Таблица 4. Анализ топливной эффективности Boeing 747

Базовая модель	Модель, оснащенная законцовками	Тип устанавливаемых законцовок	Топливная эффективность
Boeing 747-300	Boeing 747-400ER	Винглеты wingtip fence	↑ 8,5%

Следующим этапом внедрения законцовок в современную авиацию стало оснащение новой серии узкофюзеляжного ближне-средне магистрального

пассажирского лайнера Boeing 737NG новейшими на то время законцовками – «blended winglet», что также позволило ему увеличить топливную эффективность в сравнении со своим предшественником.

Таблица 5. Сравнение летно-технических хар-ик Boeing 737

Характеристика	Boeing 737-400	Boeing 737-800
Размах крыла, м	28,88	34,32
Площадь крыла, м <sup>2</sup>	105.4	125
Практический потолок, м	11 300	12 500
Практическая дальность, м	3815	5765
Крейсерская скорость, км/ч	807	852

Таблица 6. Анализ топливной эффективности Boeing 737

Базовая модель	Модель, оснащенная законцовками	Тип устанавливаемых законцовок	Топливная эффективность
Boeing 737-400	Boeing 737-800	Винглеты blended winglet	↑ 4-5%

В то же время главным конкурентом Boeing являлась компания Airbus, которая использовала на своих самолетах в качестве законцовок крылышки Уиткомба, в свою очередь они давали лишь 1,5% экономии топлива, против 4-5% на самолетах Boeing [4]. По этой причине Airbus занялись разработкой новых собственных законцовок, в следствии разработка получила название sharklets (акулы плавники), которые обеспечили их лайнерам серии NEO экономию топлива порядка 3,5-4%.

Не так давно на самолеты компании Boeing, летающие на трассах большой протяженности, начали ставить законцовки другой конструкции, называемые raked wingtips или переводя на русский язык – гребневые законцовки. Они представляют собой горизонтальные «крылышки» с большой стреловидностью (больше, чем у основного крыла). Здесь сделана ставка на эффективное увеличение удлинения крыла и за счет этого уменьшение интенсивности вихревых шнуров. Они дают уменьшение индуктивного сопротивления крыла на 5,5%. Также новой разработкой Boeing стали законцовки, получившие название «двойное перо» или винглеты Split Scimitar, которые устанавливают на модели Boeing 737-MAX. Данная конструкция экономит на 1,5% больше топлива сверх уже имеющейся [4].

### **Заключение**

Наиболее эффективным является оснащение законцовками крыла самолетов дальней протяженности, то есть – дальнемагистральных, топливная эффективность на данном типе лайнеров при установке законцовок увеличивается на 5,5-9%. Самыми эффективными законцовками является конструкция «blended winglet», которые в среднем увеличивают топливную

эффективность самолета на 4-5% в случае средне- ближнемагистральных лайнеров.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eickmann K.E. Assessment of Wingtip Modifications to Increase the Fuel Efficiency of Air Force Aircraft. Washington, DC, The National Academies Press, 2007

2. Законцовка крыла [Электронный ресурс]: свободная энциклопедия. - режим доступа: <https://ru.wikipedia.org>

3. Сакорнсин Р., Попов С. А. Улучшение аэродинамических характеристик комбинированного крыла путем добавления треугольного выступа [Электронный ресурс]: Моск. авиац. инс-т./Электрон. журн. Труды МАИ. Выпуск № 65. –режим доступа к журн.: <http://www.mai.ru/science/trudy/>

4. Шевяков, В.И. Способы совершенствования воздушных судов в целях сохранения конкурентоспособности на перспективу [Электронный ресурс]: многопредмет. науч.журн./ Моск. гос. тех.унив-т.- Электрон. журн. –режим доступа к журн.: <https://cyberleninka.ru>

### THE EFFECTIVENESS OF WINGTIPS

*Bondarenko Kristina Pavlovna<sup>1</sup>, student; Davydova Evgenia Vladimirovna<sup>1</sup>, student; Sapozhnikova Viktoria Dmitrievna<sup>1</sup>, student; Narysheva Galina Gennadevna*

*<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, 630073 Karl Marks Ave.,  
Novosibirsk, Russia*

Bondarenko K. P., e-mail: [kristina.bondarenko.99@gmail.com](mailto:kristina.bondarenko.99@gmail.com)

**Abstract.** The article deals with the types of wingtips and analysis of their effectiveness.

**Keywords:** airplane, wingtips, inductive reactance, fuel efficiency, winglet, wing extension

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА МЕТОДОМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Важнов Данил Дмитриевич, магистрант, Гордейчик Сергей Сергеевич, магистрант, Черников Александр Викторович, магистрант*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. 8(383)346-02-90

*Важнов Д.Д.*, e-mail [danil.vazhnov@mail.ru](mailto:danil.vazhnov@mail.ru)

*Гордейчик С.С.*, e-mail [serega-gordeichik@yandex.ru](mailto:serega-gordeichik@yandex.ru)

*Черников А.В.*, e-mail [chalvik@mail.ru](mailto:chalvik@mail.ru)

*Адрес для корреспонденции: Черников Александр Викторович,*  
Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (983)319-07-36

### **Аннотация**

В связи с повсеместным распространением САПР систем, необходимо рассматривать эффективные методы применения этих систем с целью автоматизации производства. Один из путей повышения эффективного применения САПР систем – упрощение информационного моделирования. Такой подход наиболее оптимален при наличии параметрически унифицированных элементов. Рассмотрим применение этого метода на этапе технологической подготовки производства. Этот этап включает в себя, в частности, создание оснащения на котором будет осуществляться процесс изготовления, а также составление технологий обработки элементов конструкций на станках с ЧПУ, процессы, которые можно привести к оптимальной унификации.

### **Ключевые слова**

Параметризация; унификация; повышение эффективности; производство; технологическое оснащение; САД-системы; САМ-системы; проектирование.

### **Введение**

Система Автоматизированного Проектирования (САПР) стала революционным изменением в машиностроительной отрасли, где начинали соединяться роли чертёжников, дизайнеров и инженеров. [1] Современные пакеты программного обеспечения для автоматизированного проектирования варьируются от 2D-векторных систем черчения до 3D-моделей твердого тела и поверхности, способных к динамическому математическому моделированию.

При этом САПРы обеспечивают контроль всего процесса проектирования — от концептуального проектирования и компоновки изделий до прочного и динамического анализа сборок и определения методов изготовления компонентов. [2] Computer aided design (CAD) стал особенно важным в области компьютерных технологий с такими преимуществами, как более низкие затраты на разработку продукта и значительно сокращенный цикл проектирования. CAD позволяет конструктору планировать и разрабатывать проекты на экране, распечатывать их и сохранять для дальнейшего редактирования, экономя время на своих чертежах.

Таким образом, можно говорить, что САПР является обязательным шагом на этапе развития любого производства. Позволяющая упростить отслеживание процесса проектирования и изготовления, она содержит в себе всю информацию жизненного цикла изделия. [3]

Поскольку разработка параметрических моделей ведётся для завода им. В. П. Чкалова – первая среда проектирования, выбранная для исследования, - Siemens NX.

Основные задачи исследования:

- 1) оптимальная унификация и параметризация типовых конструкций деталей и сборок в сборочном оснащении;
- 2) сокращение трудоемкости и себестоимости проектирования сборочных приспособлений;
- 3) автоматизация оформления конструкторской документации.

### **Теория, методика и материалы экспериментального исследования**

Существует два основных подхода к созданию информационных моделей в САПР системах: прямое и параметрическое. Прямое предоставляет свободу и гибкость, параметрическое – задание признаков и контроль размерности. Прямое моделирование позволяет быстро задавать геометрию без траты времени на признаки, ограничения и исходный проектный замысел. С помощью параметрического моделирования можно отслеживать проектный замысел используя признаки и ограничения, что дает пользователям возможность автоматически выполнять повторяющиеся изменения, например, для семейств деталей изделия – создавать в кратчайшие сроки большие объемы однотипных конструкций, отличающихся только разными размерами элементов. Такой способ позволяет за короткое время изучить различные конструктивные схемы и избежать принципиальных ошибок, изменяя только параметры или геометрические соотношения конструкции.

Таким образом формируется первая задача исследования – определить набор типовых изделий. В процессе анализа оснащения завода им. В. П. Чкалова, для реализации проекта, были выбраны компоненты сборочного оснащения, как наиболее оптимальные для исследования, а именно: телеги, козелки, рамные конструкции стапелей, набор распорок, набор кронштейнов.

Вторая задача – изучение существующих методов параметризации и возможностей существующих САПР систем. В системе «Siemens NX» представлены следующие возможности для параметризации:

- команда «выражение»;
- «семейство деталей»;
- параметризация от эскиза;
- параметризация через программирование в модуле UG/Open GRIP.

Для реализации задуманной идеи подходит только программирование в модуле UG/Open GRIP т.к. остальные варианты не позволяют составить искомый интерфейс и/или определить только оптимальные параметры, без предварительного определения всех возможных параметров при каждом использовании метода. В свою очередь, этот метод требует навыков программирования.

Альтернативные САПР системы: SolidWorks; CATIA; Autodesk; Fusion 360; Solid Edge; T-Flex. В процессе анализа перечисленных вариантов, для реализации проекта выбрана среда T-Flex. Преимущества выбора: наличие всех видов параметризации, существующих в Siemens NX; отдельный модуль для создания параметрических моделей в самой среде, без использования модулей программирования, что делает T-Flex удобным для реализации идеи; ядро T-Flex аналогично ядру Siemens NX, что делает их взаимозаменяемыми средами проектирования.

Параметризовать возможно только унифицированную конструкцию. Поэтому следующая задача, которая решалась в ходе исследования – унификация деталей и сборочных единиц (табл. 1).

Таблица 1. Унификация выбранных элементов

№ п.п.	Элемент	Предпринятые действия по унификации и результаты
1	Набор кронштейнов	Унифицированы площадки типовых кронштейнов, а также их «уши». Это привело к упрощению конструкции, унификации исполнений, сокращению количества типоразмеров, а также позволило создать изделия взаимозаменяемыми.
2	Набор распорок	Разработаны 2 исполнения конструкции типовых распорок: распорка из трубы круглого сечения и распорка из трубы квадратного сечения. Данное решение принято для вариации покупных изделий типа «труба», позволяющее конструктору выбирать необходимое исполнение, подстраивая конструкцию под наличие на предприятии тех или иных труб.
3	Козелки	Конструкция козелков выполнена в 2 исполнениях: рама швеллер + трубы квадратного сечения; швеллер + уголки. При проектировании козелков – конструктор

№ п.п.	Элемент	Предпринятые действия по унификации и результаты
		выбирает необходимое исполнение, основываясь на нагрузке, прилагаемой к козелкам. Унификация ложементов для козелков не применялась, поскольку они проектируются от криволинейного теоретического контура самолётных изделий.
4	Телеги	Телега выполнена в 4 исполнениях: с обычной рамой; с усиленной рамой; с площадками под платформенное крепление колеса; с площадками под осевое крепление колеса (в свою очередь подразделяется на 2 исполнения: с двусторонней поворотной осью; с односторонней поворотной осью). В телеге имеется возможность выбора количества площадок под ложементы и шаг расположения площадок. Сами площадки, как и вся рама параметризованы, что позволяет задавать им необходимые размерные характеристики. Унификация ложементов телеги так же отсутствует.
5	Рамные конструкции ступеней	Рамная конструкция ступеней выполнена в 2 исполнениях: цельная и составная. Присутствует возможность вариации габаритов, размеров «ног», а также количества и шага площадок под кронштейны (функцию можно отключить при необходимости).

Следующая задача – реализация представленных действий по унификации через осуществление параметрического моделирования в представленных средах моделирования. Итог: библиотека стандартизированных элементов.

### Результаты и обсуждение

Унификация соединения деталей друг с другом привела к сокращению видов присоединительных элементов деталей и возможности их параметризации.

В моделях представленных конструкций присутствует возможность выбора из нескольких однотипных элементов (например: трубы, швеллера, уголки), а также их размеров. Для каждой сборки создавались параметризованные модели, прописывались их связи с базами данных и с сопрягаемыми деталями.

Для уменьшения количества моделей, без потери их необходимого разнообразия, в каждой 3D модели была реализована возможность задания различных конфигураций детали. Наряду с этим стояла задача не «утяжелить» деталь чрезмерным разнообразием исполнений. Чертежи, как и модель, параметризованы. При выставлении параметров модели – эти же параметры присваиваются чертежу, что сокращает временные затраты на оформление КД.

Таким образом результатом проекта служит набор полностью параметризованных типовых моделей сборочного оснащения, что в свою очередь, существенно сокращает временные затраты на их проектирование.

### **Выводы**

Полученная библиотека стандартизированных конструкций позволит повысить эффективность производства через сокращение времени технологической подготовки производства, сократить трудоемкость и себестоимость проектирования сборочных приспособлений.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. САПР. Режим доступа: [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:САПР\\_Системы\\_автоматизированного\\_проектирования](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:САПР_Системы_автоматизированного_проектирования) (дата обращения: 08.05.2020).
2. Применение автоматизированных систем распределенного проектирования конструкторско-технологической документации на предприятиях машиностроения. Режим доступа: [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:САПР\\_Системы\\_автоматизированного\\_проектирования](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:САПР_Системы_автоматизированного_проектирования) (дата обращения 10.05.2020).
3. Системы автоматизированного проектирования и технологической подготовки производства. Режим доступа: <https://mmi.urfu.ru/ru/abiturient/napravlenija-podgotovki-i-obrazovatelnye-programmy/sistemy-avtomatizirovannogo-proektirovanija-i-tekhnologicheskoi-podgotovki-proizvodstva/> (дата обращения 10.05.2020).

### **INCREASING THE EFFICIENCY OF TECHNOLOGICAL PREPARATION OF PRODUCTION USING PARAMETRIC MODELING**

*Vazhnov Danil Dmitrievich, Graduate Student, e-mail [danil.vazhnov@mail.ru](mailto:danil.vazhnov@mail.ru)*

*Gordeychik Sergey Sergeevich, Graduate Student, e-mail [gordeichik@yandex.ru](mailto:gordeichik@yandex.ru)*

*Chernikov Alexander Viktorovich, Graduate Student, e-mail [chalvik@mail.ru](mailto:chalvik@mail.ru)*  
Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Ave. 20, tel. 8 (383) 346-02-90

### **Abstract**

In connection with the widespread use of CAD systems, it is necessary to consider effective methods of using these systems in order to automate production. One of the ways to improve the effective use of CAD systems is to simplify information modeling. This approach is most optimal in the presence of parametrically unified elements. Let's consider the application of this method at the stage of production as technological preparation. This stage includes, in particular, the creation of equipment on which the manufacturing process will be carried out, as

well as the development of technologies for processing structural elements on CNC machines, processes that can lead to optimal unification.

### **Keywords**

Parameterization; unification; increase in efficiency; production; technological equipment; CAD systems; CAM systems design.

**УДК 629.7.083**

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ SLM ТЕХНОЛОГИЙ 3D ПЕЧАТИ В АВИАСТРОЕНИИ**

*Денисюк Данил Владимирович, бакалавр; Ивлев Дмитрий Юрьевич,  
бакалавр; Кузнецов Артур Олегович, бакалавр*

Новосибирский государственный технический университет, 630073,  
Россия,

г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (383)346-06-09

*Денисюк Д.В.*, email [danil301198@yandex.ru](mailto:danil301198@yandex.ru)

*Ивлев Д.Ю.*, email [iv.bom@mail.ru](mailto:iv.bom@mail.ru)

*Кузнецов А.О.*, email [arturkuzartur@gmail.com](mailto:arturkuzartur@gmail.com)

*Адрес для корреспонденции: Денисюк Данил Владимирович*

Новосибирский государственный технический университет, 630073,  
Россия, г. Новосибирск,

пр. Карла Маркса, 20, тел. (913)728-71-10

### **Аннотация**

В данной статье поставлена задача показать актуальность использования аддитивных технологий в авиастроении на примере изготовления РУСа (ручка управления самолетом) самолёта СУ-27 с помощью SLM технологии 3D печати. Описаны подбор оборудования и материала, сравнение способов изготовления методом литья и SLM 3D печати. Данный метод так же применим к огромному количеству деталей от других самолётов.

### **Ключевые слова**

SLM печать, РУС, САD-модель, металлический порошок, NX.

### **1. Введение**

В истории человечества существует множество примеров изобретения новых технологий, используемых для решения современных задач. В 21 веке предприятия придерживаются политики экономии ресурсов, а также увеличения производительности и именно поэтому все чаще аддитивные

технологии приходят на смену обыденным. Рассмотрим использование относительно новых технологий 3D печати в авиастроении.

## 2. Описание технологии и детали

SLM печать - технология производства сложных изделий посредством лазерного плавления металлического порошка по математическим CAD-моделям. Суть технологии заключается в том, что деталь делается послойно в 2D форме. Это позволяет создавать детали с внутренними полостями, имеющими сложные геометрические формы и при этом всё КИМ данного способа составляет от 50% до, практически, 100%. Так же это позволяет изготавливать детали, не прибегая к использованию какой-либо оснастки.

В качестве рассматриваемого оборудования выступает станок с названием SLM Solutions SLM 500 (рис. 1). Его характеристики, такие как габариты рабочей поверхности в частности, удовлетворяют требованиям по габаритам для данной детали.



Рис. 1. Станок SLM Solutions SLM 500

Данный комплекс включает в себя сам станок, систему подачи порошка и систему очистки уже отработавшего порошка для использования вновь. Также он является полностью автономным и не требует постоянного присутствия оператора. При этом за один цикл работы можно изготовить сразу несколько деталей разом.

В качестве примера рассмотрим создание неотчетливой детали, имеющую неплоскую геометрическую форму – РУС (рис. 2).

Данная деталь имеет 9 отверстий, изогнутую форму и является, по сути, полый трубой.



Рис. 2. РУС – ручка управления самолетом

### 3. Производство детали

Далее пойдёт сравнение производства детали классическим методом и новым методом SLM 3D печати.

Изготовление детали нынешним методом начинается с литья самого тела. Далее следует очистка от остаточного материала, зачистка контактных поверхностей с помощью фрезы, снятие заусенцев, изготовление фасок, рассверливание отверстий, нарезка резьбы для винтовых соединений (в частности, для фиксации крышки РУСа), шлифовка резких переходов и острых краев/ мест стыков, получившихся в результате неидеальной технологии литья. Для операций сверления требуется оснастка, так как деталь имеет довольно непростую геометрию. Производят ребрение рукояти.

Использование новой технологии начинается с переноса детали с бумажного носителя в электронную модель. В качестве среды разработки используется система автоматизированного проектирования NX версии 12. Данная среда позволяет нам перенести нашу 3D модель в стандартный отраслевой формат STL.

Габаритные размеры 204\*46\*80 мм позволяют делать сразу несколько деталей за один цикл работы станка. В качестве материала можно использовать обычную сталь 30ХГСА в виде мелкодисперсного порошка.

Одним, и, пожалуй, единственным недостатком будет являться то, что после печати детали в принтере нужно подготовить поверхности, которые в дальнейшем будут присоединяться к чему-нибудь или на них будет становиться крышка, как изображено на рисунке 2. Связано это с использованием материала, а именно – порошка, который упоминался ранее. Размеры частиц достигают в среднем 60 мкм (от 40 до 80 мкм), ввиду чего качество поверхности уменьшается до шероховатости Ra 20 - 30.

Поэтому может потребоваться ещё одна операция – фрезерование или шлифование конкретной области детали.

#### 4. Заключение

Вся суть нововведения заключается в том, что процедура изготовления детали сильно упрощается. Для этого достаточно одного оператора станка и сам станок, при этом за раз производится сразу несколько деталей. Отпадает необходимость в разработке и создании специальной оснастки, без использования огромного количества людей и инструмента, что ведёт к удешевлению производства. Также исключается вероятность брака, тем самым и увеличивается общее качество производства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Фомин А. Су-27. История истребителя – М.: Интервесник, 2004. – 456 с.
- 2) Кэнесс Э., Фонда К., Дзеннаро М. Доступная 3D печать для науки, образования и устойчивого развития – М.: Международный центр теоретической физики, 2013. – 192 с.
- 3) GLOBATEK.3D [Электронный ресурс]: SLM (Selective Laser Melting) — технология 3D-печати. – 2020. URL: [http://3d.globatek.ru/production/slm\\_500hl/](http://3d.globatek.ru/production/slm_500hl/)
- 4) Хабр [Электронный ресурс]: Концепция 3D принтера, печатающего металлом с большим разрешением и огромной скоростью. -2018. URL: <https://habr.com/ru/post/348628/>

#### USING SLM 3D PRINTING TECHNOLOGIES IN THE AIRCRAFT

*Denisyuk Danil Vladimirovich, Bachelor;*

*Ivlev Dmitry Yuryevich, Bachelor;*

*Kuznetsov Arthur Olegovich, Bachelor*

Novosibirsk state technical University, 20, Karl Marx Ave., Novosibirsk,  
630073, Russia, tel. (383)346-06-09

*Denisyuk D.V., email danil301198@yandex.ru*

*Ivlev D.Y., email iv.bom@mail.ru*

*Kuznetsov A.O., email arturkuzartur@gmail.com*

*Address for correspondence: Denisyuk Danil Vladimirovich,*

Novosibirsk state technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, Karl  
Marx Ave., 20, tel. +7(913)728-71-10

#### Annotation

This article aims to show the relevance of the use of additive technologies in aircraft manufacturing using the example of the manufacture of ACS (aircraft control stick) SU-27 aircraft using SLM 3D printing technology. The selection of equipment and material, a comparison of casting methods and SLM 3D printing are described. This method is also applicable to a huge number of parts from other aircraft.

## **Keywords**

SLM printing, ACS, CAD-model, metal powder, NX.

УДК 553.98:550.84

## **ИНТЕГРИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ 3D ПЕЧАТИ В АВИАСТРОИТЕЛЬНУЮ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ**

*Елистратов Андрей Александрович, Рынгач Николай Анатольевич*

Новосибирский государственный технический университет, 630073,  
Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

*Адрес для корреспонденции: Елистратов Андрей Александрович,*  
Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия,  
г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.  
Елистратов А. А., e-mail [aaa97@bk.ru](mailto:aaa97@bk.ru)

### **Аннотация**

В статье рассматривается специфика использования 3D-принтера для печати технологического оснащения в авиастроительной промышленности. Определены основные проблемы и преимущества интеграции 3D-печати в производство. В заключение отмечены перспективы использования такой технологии для изготовления технологического оснащения.

**Ключевые слова:** *3D печать, технологическая оснастка, авиация, производство.*

### **Введение**

В настоящее время технологическая оснастка изготавливается из металла и дерева, что предполагает следующее: длительный производственный цикл, вредное производство, использование невозобновляемых или трудно возобновляемых материалов. Нет необходимости переходить на производство технологической оснастки путем печати на 3D-принтере, но, тем не менее, эта технология имеет ряд преимуществ.

На авиационном заводе ПАО им. В.П. Чкалов (далее - Объект) изготавливаются не только самими детали самолета, но и технологическое оснащение для их изготовления. Это требует больших дополнительных финансовых и временных затрат. Исходя из этого, Объект постоянно работает над совершенствованием технологий производства с целью снижения этих затрат.

### **Разработка методов решения задачи**

Один из самых широких шагов Объекта в направлении снижения затрат на производство технологического оборудования - это внедрение технологии

3D-печати. Это совершенно новая область для предприятия и для авиастроения в целом, но, согласно теоретическим расчетам, преимущества его использования очевидны:

- сокращение времени производственного цикла приспособления;
- уменьшения массы приспособлений (пластик в несколько раз легче используемых металлов и сосны);
- сокращение количества необходимых специалистов (непосредственно для печати необходим только 1 оператор);
- уход от вредного производства;
- использование возобновляемых, экологически чистых материалов.

Следовательно, интегрирование технологии 3D печати технологического оснащения в авиастроительную промышленность имеет большие перспективы. Уже на стадии планирования видны преимущества 3D печати над традиционным производством оснащения из металла или сосны.

### **Выводы**

В результате планируется доказать конкурентоспособность технологии 3D печати в сфере изготовления технологического оснащения, а возможно даже её преимущество над традиционными методами производства.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ахметов И. Г. Молодой учёный / Ахметова М. Н., Иванова Ю. В., Каленский А. В. и др. // Науч. журнал. – 2015. – 48 с.
2. Балашов А. В., Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью / Балашов А. В., Маркова М. И. // Инженерный вестник Дона №1. – 2019.
3. Tianyun Y., A novel generalized stress invariant-based strength model for inter-layerfailure of FFF 3D printing PLA material / Tianyun Y., Kai Z., Zichen D. // Elsevier. – 2020.
4. Строганов Р. 3D печать. Коротко и максимально ясно / проект LittleTinyH // изд. LittleTinyH. – Россия. – 2016
5. PLA-пластик для 3D-печати [Электронный ресурс] / 3D today // 3dtoday.ru – Москва, – Режим доступа: [https://3dtoday.ru/wiki/PLA\\_plastic/](https://3dtoday.ru/wiki/PLA_plastic/) – Загл. с экрана.
6. Всё о 3D-печати. Аддитивное производство. [Электронный ресурс] // 3D today // 3dtoday.ru – Москва, – Режим доступа: [https://3dtoday.ru/wiki/3D\\_print\\_technology/](https://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technology/) – Загл. с экрана.
7. Промышленная 3D печать в металлургии [Электронный ресурс] / Metal Working // metalworking-expo.com – г. Екатеринбург, ЭКСПО-бульвар, д.2 – Режим доступа: <https://metalworking-expo.com/blog/promyshlennaya-3d-pechat-v-metallurgii/> – Загл. с экрана.

8. 3D-принтеры в различных сферах производства [Электронный ресурс] /Globatek3D, 3D оборудование для профессионалов // 3d.globatek.ru – Москва, Варшавское шоссе, 42 – Режим доступа: <https://3d.globatek.ru/3d-printers/factory/> – Загл. с экрана.
9. 3D-принтеры с разной кинематикой: сравнение, плюсы и минусы [Электронный ресурс] / Top 3D Shop // top3dshop.ru – Москва, – Режим доступа: <https://top3dshop.ru/blog/types-of-fdm-3d-printer.html> – Загл. с экрана.
10. Основные методы и виды 3D печати [Электронный ресурс] / 2d-3d // 2d-3d.ru – Москва 4-ый Войковский проезд, – Режим доступа: <https://www.2d-3d.ru/opisanie-programm/1536-osnovnyye-metody-3d-pechati.html> – Загл. с экрана.
11. Сравнение ABS, PLA, SBS, PETG [Электронный ресурс] / Bestfilament // rusabs.ru – Москва – Режим доступа: <https://rusabs.ru/blogs/blog/razlichie-mezhdu-abs-i-pla-dlya-3d-pechati> – Загл. с экрана.
12. Термическая обработка 3D печатных изделий из пластмасс [Электронный ресурс] / Международный научно-исследовательский журнал // research-journal.org – Москва – Режим доступа: <https://research-journal.org/technical/termicheskaya-obrabotka-3d-pechatnyx-izdelij-iz-plastmass/> – Загл. с экрана.

## INTEGRATION OF 3D PRINTING TECHNOLOGY IN THE AIRCRAFT INDUSTRY

*Elistratov Andrey Alexandrovich, Ryngach Nikolay Anatolyevich*

Novosibirsk State Technical University,  
630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20

*Elistratov A.A.*, email eaa97@bk.ru

*Address for correspondence: Andrey Elistratov, Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20.*

### **Abstract**

The article describes the specifics of using a 3D printer for printing technological equipment in the aircraft industry. The main problems and advantages of integrating 3D printing into production are identified. In the conclusion, the prospects of using this technology for the manufacture of technological equipment are noted.

**Key words:** 3D printing, technological equipment, aviation, production.

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВХОДНОГО КОНФУЗОРА НА ПОДЪЕМНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯЧЕЙКИ МУЛЬТИРОТОРНОЙ ПЛАТФОРМЫ

*Куликов Виталий Владимирович*

Новосибирский государственный технический университет, 630073,  
Россия, г.Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

*Куликов В.В.*, e-mail: [asmodey3598@yandex.ru](mailto:asmodey3598@yandex.ru)

Адрес для корреспонденции: Куликов Виталий Владимирович  
Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия,  
г.Новосибирск, пр.Карла Маркса, 20

### **Аннотация**

В данной статье рассмотрена методика оценки прироста тяги создаваемого входным конфузуром, приведены основные решения по поиску оптимума между размерами конфузуров и его весом, а также рассмотрены основные явления понижающие тягу и методы борьбы с ними. Проанализированы различные конфигурации конфузуров и их преимущества и недостатки.

**Ключевые слова:** конфузор, тяга

Необходимость создания подъемных ячеек для осуществления транспортной связи является одной из наиболее важных задач проектирования современных летательных аппаратов. Большинство подъемных платформ представлены различного типа мультикоптерами. В основной своей части, это легкие беспилотные и дистанционно управляемые летательные аппараты, предназначенные для наблюдения, аэрофотосъемки, доставки легких малогабаритных грузов и в развлекательных целях.

В данном исследовании рассматривается ячейка мультироторной платформы и способы улучшения ее эффективности с помощью увеличения статической тяги. Тяга данных платформ ограничена мощностью двигателей, а, следовательно, переносимый вес напрямую зависит только от данного параметра. В представленной работе предлагается улучшение подъемных свойств ячейки за счет использования входных конфузуров перед винтом, на которых образуется разряжение, создающее дополнительную подъемную силу. Кроме того добавление конфузуров позволит помимо создания дополнительной тяги защитить винты от попадания в них предметов, которые могут привести к разрушению платформы.

Цель исследования заключается в разработке методики оценки возможного прироста тяги от наличия и параметров конфузора, установленного в передней части винта для вертикальной подъемной ячейки.

В работе сравниваются 4 конфигурации зондов, создаваемый ими прирост как в теоретической основе, так и в практическом исследовании.

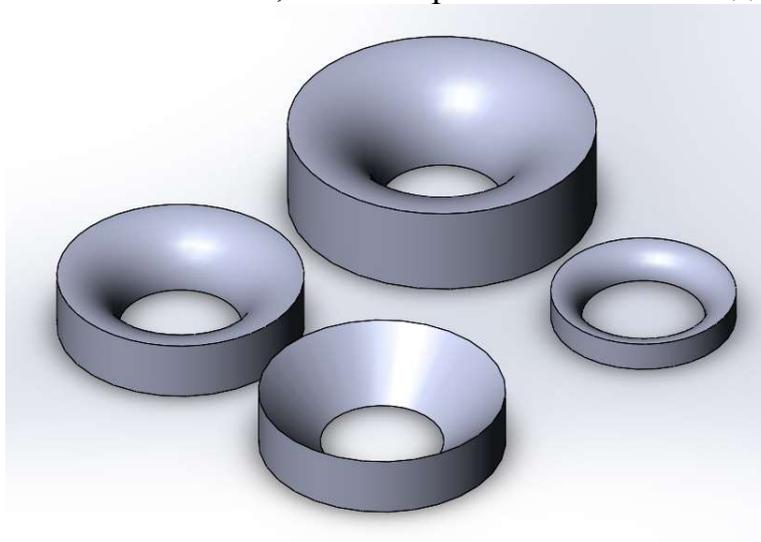


Рисунок 1 — Модели конфузоров

Прирост тяги будет представлять собой следующее отношение сил:

$$\Delta = \frac{F_{\Sigma i}}{F_k}$$

Здесь:  $F_k = \Delta P S_k = \frac{\rho v_k^2}{2} S_k$

$$F_{\Sigma i} = \sum \Delta P_{ст.i} \Delta S \cdot \sin \gamma$$

$$v_k = \sqrt[3]{\frac{\eta N_{мех.}}{2 \rho S_k}}$$

$F_{\Sigma i}$  — сила прироста создаваемая конфузуром;

$S_k$  и  $v_k$  — площадь и скорость в самой узкой части конфузуров соответственно;

$F_k$  — тяга создаваемая винтами;

$\Delta S$  — площадь кольца действия силы;

$\gamma$  — угол между проекциями компонент статического давления;

$\eta$  и  $N_{мех.}$  — КПД финты и механическая мощность соответственно.

Результаты расчета по данной математической модели сведены в таблицу 1:

Таблица 1. Теоретический прирост тяги

Конфузор	Прирост тяги, [%]
Круглый, радиус образующей $0,5r^1$	23
Круглый, радиус образующей $1r$	31
Круглый, радиус образующей $1,5r$	34
Конический с шириной основания 115 мм	38

Как видно с ростом размера конфузора, растет и прирост подъемной силы создаваемой конфузором.

Результаты эксперимента и сравнение ее с теоретической моделью приведены в таблице 2:

Таблица 2. Сравнение результатов

Модель	Теоретические оценки, [%]	Экспериментальные результаты, [%]
Круглый, радиус образующей $0,5r$	23	6,47
Круглый, радиус образующей $1r$	31	7,50
Круглый, радиус образующей $1,5r$	34	8,27
Конический с шириной основания 115 мм	38	5,27

Из результатов представленных в Таблице 2 видно, что прирост тяги непропорциональный, для разных конфузоров. Данные явления могут объясняться несколькими факторами, а именно:

- Донным давлением, создаваемым неоднородностью потока;
- Неоптимальной геометрией винта;
- Иной картиной изолиний;
- Другой картиной распределения давления на поверхности.

Был проведен ряд экспериментов подтвердивших предположение о картине изолиний и о влияние донного давления.

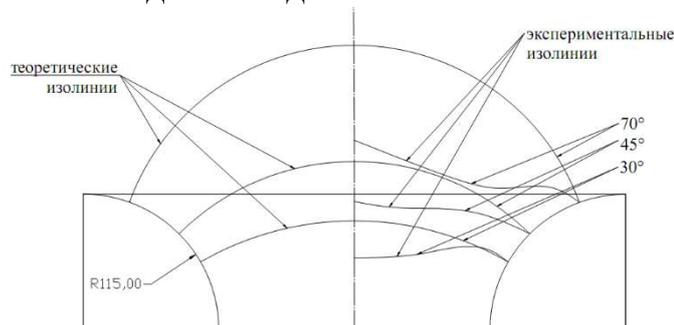


Рисунок 2 — Теоретическая и практическая картина изолиний давления

По результатам проведенных экспериментов было установлено распределение давления по поверхности конфузора:

<sup>1</sup> r — радиус в сечении винтов (критическом сечении).

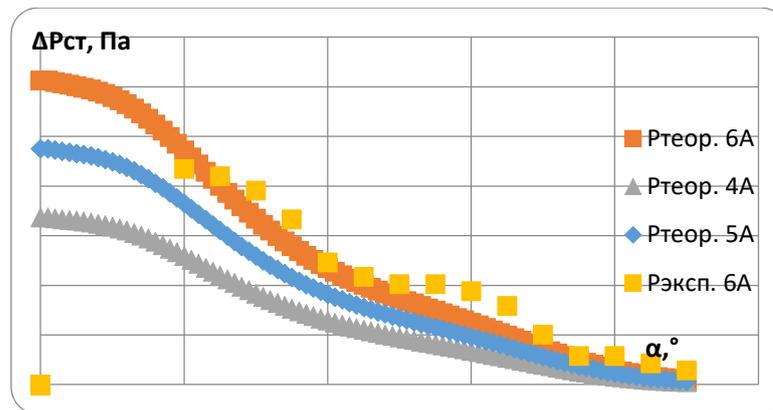


Рисунок 3 — Диапазон распределений давлений для разных значений тока

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обуховский А.Д., Аэродинамика воздушного винта. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 80с
2. Остроухов С. П., Аэродинамика воздушных винтов и винтокольцевых движителей: - М.: Физматлит, 2014. – 328 с
3. Абрамович Г. Н., Прикладная газовая динамика. Часть 1. – М.: Наука, 1991. – 600 с
4. Фабрикант Н. Я., Аэродинамика. Общий курс. – М.: Наука, 1964. – 816 с
5. Geldenhuys Н. J., Aerodynamic development of a contra-rotating shrouded rotor system for a UAV. — 2015. – 92с
6. Chao Huoi, Peng Lv, Anbang Sun. Computational study on the aerodynamics of a long-shrouded contra-rotating rotor in hover. In: International journal of micro air vehicles, Volume 11: 1-17, 2019. 17с

### STIMATION OF THE EFFICIENCY OF THE INPUT CONFUSER FOR THE LIFTING CHARACTERISTICS OF THE CELL OF THE MULTIROTOR PLATFORM

**Kulikov Vitaly Vladimirovich**

**Novosibirsk State Technical University,  
630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20  
Kulikov V.V., e-mail: [asmodey3598@yandex.ru](mailto:asmodey3598@yandex.ru)**

*Address for correspondence: Kulikov Vitaly Vladimirovich*

Novosibirsk State Technical University 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk,  
630073, Russia

#### **Abstract**

The article discusses the methodology for assessing the increase in thrust of the performed inlet confuser, considers the main solutions for finding the optimum between the confuser size and its weight, and also considers the main solutions for

reducing the thrust and methods of dealing with them. Various confuser configurations and their advantages and disadvantages are analyzed.

**Key words:** confuser, thrust

**УДК 629.7.023.222**

## **УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗМЕРНОГО ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

*Малашенко Дмитрий Игоревич, Рынгач Николай Анатольевич*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия,  
г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (383)346-06-09

Новосибирский авиационный завод им. В.П. Чкалова, 630051, Россия,  
г. Новосибирск, Ползунова, 15, тел. (383)278-85-01

*Малашенко Д. И.*, email: [410nsk@mail.ru](mailto:410nsk@mail.ru)

*Адрес для корреспонденции: Малашенко Дмитрий Игоревич*, Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (383)346-02-31

### **Аннотация**

Поиск оптимальных технологий в производстве деталей летательных аппаратов является одним из важнейших проблем самолетостроения. Одним из традиционных методов обработки деталей является технология размерного химического травления (иначе: химическое фрезерование). Данный способ обработки занимает особую нишу в производстве деталей летательных аппаратов, однако, для него существует потенциал к улучшению, с чем связана и *актуальность* данной работы. Также существует возможность расширения применения данного метода на предприятии.

### **Ключевые слова**

Усовершенствование, размерное химическое травление металла, технология, обработка деталей.

### **1. Введение**

Большинство агрегатов летательных аппаратов – это конструкции с работающей обшивкой. Так как распределение сил на конструкции неравномерно, обшивки требуется изготавливать переменной толщины. Например, использование технологии РХТ для уменьшения количества сборочных операций и повышения равнопрочности конструкции. Так же за счет уменьшения разнообразных концентраторов напряжений (к примеру, точечных соединений) повышается усталостная прочность конструкции. С помощью технологии химического фрезерования существует возможность образования многоступенчатого усиления, что дает плавное распределение

сосредоточенной силы. С помощью данного метода также ведется обработка сложных геометрических форм и монолитной конструкции, что также может увеличивать равнопрочность конструкции. Так же к плюсам этого метода обработки можно отнести простоту промышленного внедрения, так как процесс не требует дорогого и уникального оборудования и высококвалифицированных работников.

Целью данной работы является совершенствование технологии химического фрезерования.

Поставленные задачи:

– Выявление преимуществ и недостатков технологии размерного химического травления перед другими методами обработки деталей.

– Поиск возможностей устранения недостатков или уменьшения их влияния.

Перспективами исследования в данном вопросе являются:

– Исследование возможностей применения автоматизации в производстве.

– Увеличение точности методики расчета припуска на боковой подтрав.

– Поиск и применение новых технических решений.

## 2. Теория

Сущность процесса размерного химического травления заключается в реакции некоторых компонентов сплава с травящим раствором кислоты или щелочи. Схематическое изображение процесса приведено на рисунке 1.

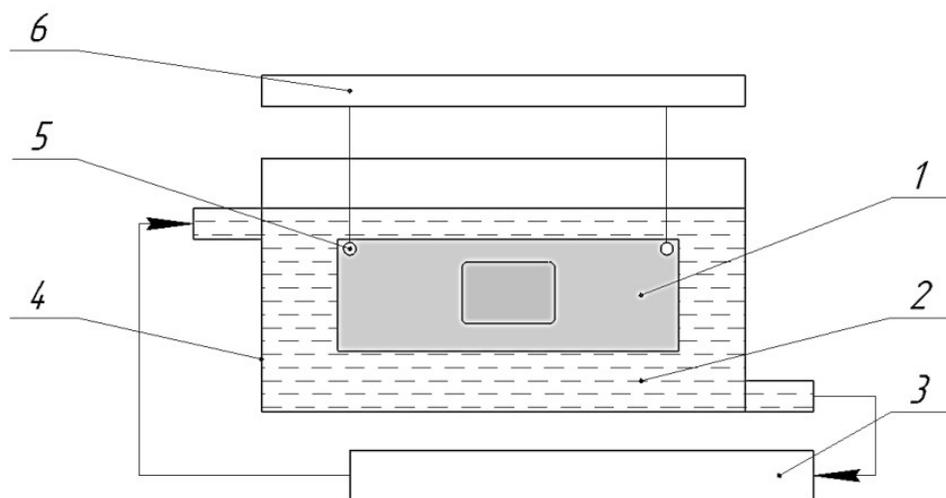


Рисунок 1 – Схема процесса размерного химического травления:

1 – заготовка; 2 – травитель; 3 – блок регенерации травителя;

4 – ванна для травления; 5 – зажим; 6 – подъемно-транспортное устройство

Заготовки подвергаются трудоёмким операциям нанесения защитного покрытия, а затем с помощью специальных приспособлений опускаются в ванну с травителем, где и происходит реакция кислоты или щелочи с незащищенной поверхностью заготовки. При этом поддерживается стабильная концентрация рабочей жидкости. Глубина травления зависит от скорости травления и времени контакта травильного раствора с заготовкой.

Благодаря тому, что скорость травления регулируется концентрацией активного вещества и составляет малые величины (от 0.5 мм/ч), возможно обеспечения высокой точности фрезерования. На данный момент технология размерного химического травления применяется при образовании местных утолщений листовых заготовок в производстве обшивок летательных аппаратов.

### **3. Результаты и обсуждение**

Совершенствование процесса химического фрезерования алюминиевого сплава. Одним из наименее освещенных вопросов в литературных источниках является расчет припуска на боковой подтрав. Имеется множество рассмотренных в работе факторов, но их взаимодействие не даёт точно спрогнозировать конечный результат, так как малейшее отклонение одного фактора ведет к изменению остальных факторов в технологии. Одно из решений данной проблемы - приблизительная оценка припуска по имеющимся практическим данным, что характеризует низкую точность расчета и ведет к снижению качества продукции. Поэтому целесообразно выделить несколько факторов и провести практические исследования по взаимовлиянию этих факторов.

Для проведения исследовательской работы были выдвинуты следующие задачи:

- изготовить несколько образцов из одного материала методом химического фрезерования, задав разные параметры травления для каждого;
- исследовать полученные образцы, а именно: геометрию бокового подтрав, состояние поверхности деталей (шероховатость, дефекты);
- провести анализ полученных данных;
- разработать рекомендации по совершенствованию методики расчета припуска.

Также в ходе работы над разделом были выявлены недостатки существующего процесса и для некоторых из них были выдвинуты решения по их исключению или уменьшению.

### **4. Выводы**

В результате работы была изучена технология размерного химического травления листовых деталей, выявлены актуальные проблемы данной технологии и предложены пути её совершенствования.

В ходе работы с помощью исследуемого метода были подготовлены пять образцов из материала АК4-1, два из которых были обработаны многоступенчатым методом и затем разбиты на группы образцов. Группы образцов были исследованы на конфокальном микроскопе. В среде Microsoft Excel 2010 были проанализированы полученные отклонения от теоретического контура, качество поверхности. В результате были выявленные следующие несоответствия: отклонения толщины, отклонения расположения переходов (скосов), различные дефекты поверхности, – а также даны рекомендации по их исключению. Также была разработана

методика расчёта припуска на боковой подтрав при многоступенчатом травлении.

Основной рекомендацией к дальнейшим исследованиям является – *горизонтальное расположение заготовки в травителе*, которое обеспечит наиболее предсказуемое поведение процесса и избавит от нежелательных отклонений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ямпольский А.М., Ильин В.А. Краткий справочник гальванотехника. – Санкт-Петербург: Машиностроение, 2012. – 269 с.
2. Астахин В.В., Трезвов В.В., Суханова И.В. Электроизоляционные лаки. – М.: Химия, 2015. – 216 с.
3. Стерин И.С. Машиностроительные материалы для молодых рабочих. – Санкт-Петербург: Лениздат, 2017. – 272 с.
4. Лайнер В.И. Техминимум по гальваностегии. – М.: Полиграфика, 2014. – 343 с.
5. Вячеславов П.М. Оборудование цехов электрохимических покрытий. – Санкт-Петербург: Машиностроение, 2016. – 309 с.
6. Ануров А.А., Нестеров Ю.И. Гальванические токопроводящие покрытия. – М.: Машиностроение, 1983. – 63 с.
7. Государственные стандарты. Лаки, краски и вспомогательные материалы. Часть 1. – М.: Государственное издательство стандартов, 1963. – 276 с.
8. Гольдберг М.М. Лакокрасочные покрытия в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1974. – 576 с.
9. Ажогин Ф.Ф., Беленький М.А., Галль Е.И. Гальванотехника. – М.: Металлургия, 1987, 736 с.
10. Сухотин А.М. Справочник по электрохимии. – Санкт-Петербург: Химия, 1981. – 488 с.
11. Байсупов И.А., Волосатов В.А. Справочник молодого рабочего по электрохимобработке. – М.: Высшая школа, 1983. – 175 с.
12. ГОСТ 9.049 – 91. Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерных и их компоненты. – Введ. 1972-07-01. – М.: Издательство стандартов, 1994 – 45 с.
13. ГОСТ 6433.3 – 71. Материалы электроизоляционные твёрдые. – Введ. 1972-07-01. – М.: Издательство стандартов, 1998 – 52 с.
14. ГОСТ 270 – 75. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении. – Введ. 1978-01-01. – М.: Стандартинформ, 2008 – 59 с.
15. ГОСТ 9.902 – 81. Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные. – Введ. 1982-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1987 – 37 с.

## **IMPROVEMENT OF PRODUCTION OF SHEETS MILITARY AIRCRAFT**

*Malashenko D.I, Ryngach N.A*

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, Karl  
Marx Ave. 20, tel. (383) 346-02-31

*Malashenko D.I*, email [410nsk@mail.ru](mailto:410nsk@mail.ru)

*Address for correspondence: Malashenko D.I,*

Novosibirsk State Technical University 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk,  
630073, Russia

### **Abstract**

The search for optimal technologies in the production of aircraft parts is one of the most important problems in aircraft construction. One of the traditional methods of processing parts is the technology of dimensional chemical etching (otherwise: chemical milling). This method of processing occupies a special niche in the production of aircraft parts, however, there is potential for improvement for it, which is also related to the relevance of this work. There is also the possibility of expanding the application of this method in the enterprise.

### **Keywords**

Improvement, dimensional chemical etching of metal, technology, processing of parts.

**УДК 629.7.01**

## **КОНТРОЛЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ РАБОЧИХ ЖИДКОСТЕЙ В ЛЕТАТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ**

*Репин Владимир Сергеевич, Мальцева Ирина Сергеевна,  
Каликина Наталья Алексеевна*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г.  
Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (383)346-06-09

*Репин В.С.*, email [vovarepin1999@mail.ru](mailto:vovarepin1999@mail.ru)

*Мальцева И.С.*, email [irinaa11101011@gmail.com](mailto:irinaa11101011@gmail.com)

*Каликина Н.А.*, email [okutina.2017@stud.nstu.ru](mailto:okutina.2017@stud.nstu.ru)

Адрес для корреспонденции: Репин Владимир Сергеевич  
Новосибирский государственный технический университет,  
630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (913)728-71-1

## **Аннотация**

Показанные существующие методики и средства контроля степени загрязнения рабочей жидкости в различных системах и агрегатах ЛА. Представлена возможность роста достоверности контроля результатов.

**Ключевые слова:** контроль, стандарт чистоты, проба, жидкостная система, летательный аппарат.

## **Введение**

Контроль стандартов чистоты на производстве летательных аппаратов является одним из ключевых направлений на современном предприятии. При обслуживании и производстве ЛА нередко в изделия попадают посторонние предметы. Вследствие чего конечный итог не совпадает с расчетными характеристиками и не получается добиться требуемой долговечности и надежности. Рассмотрим варианты решения данной проблемы на загрязненности рабочих полостей жидкостных систем летательного аппарата

### **1. Методы контроля загрязнения**

В соответствии с ГОСТ и ОСТ допускается применение прямых и косвенных методов контроля. Под прямым методом контроля подразумевают непосредственное измерение загрязнений на рабочих поверхностях. В свою очередь, косвенный метод основан на сравнении функционирования незагрязненной и загрязненной системы.

Для современного производства не предусматривается метод прямого контроля, так как осуществить его не представляется возможным. В большинстве случаев применяют косвенные методы контроля. В таком случае за показатели загрязненности рабочих поверхностей используют показатели загрязненности рабочей жидкости, которой может служить жидкость, проходящая через данные поверхности.

Соответственно такой контроль требует наличие отбора пробы жидкости, который задается нормативными документами для последующего анализа с использованием приборов автоматического контроля состояния загрязненности.

### **2. Процесс отбора жидкости и возникающие проблемы**

Метод, которым отбирают пробы, подразумевает под собой комплекс операций с использованием средств для отбора проб. Этот метод должен гарантировать надежность этой пробы. Надежность в свою очередь зависит от следующих условий:

- Пробы, которые берут из сливного трубопровода, должны иметь усредненный уровень загрязнений по сечению трубы.
- В течение времени, которое потребуется для транспортировки проб, должна быть обеспечена сохранность достоверности этих проб до места проведения дальнейшего анализа.

- Т.к. в процессе контроля количество загрязнения по сечению может изменяться, требуется проведение экспериментов для сохранения представительности пробы рабочей жидкости. Представительности пробы зависит от состава и свойств загрязнителя особенностей очищаемой (контролируемой) системы, особенностей промывочного оборудования и самих устройств отбора проб.

Вышеперечисленные условия должны строго выполняться, так как несоблюдение хотя бы одного из них ведет к тому, что пробы будут недостоверны, и как следствие приведут к ошибкам результатов анализа, то есть оценка состояния загрязнений жидкостных систем и агрегатов будет дана неверно. Обеспечение выполнения этих условий – сложная задача. Были проведены эксперименты, где использовалось пробоотборный механизм, который позволил исследовать заборочным соплом всю площадь поперечного сечения жидкости в точке отбора. По результатам эксперимента было установлено, что в системах изделий АТ выполнение данных условий практически невозможно. Именно по этой причине главной погрешностью в определении уровня загрязнений рабочих полостей жидкостных систем и агрегатов является этап непосредственного отбора проб жидкости для анализа.

Исследование результатов проведенных методов и средств для отбора жидкости выявило, что для того, чтобы повысить уровень достоверности взятых проб, необходимо использовать изокинетический метод отбора. При осуществлении данного метода скорость потока жидкости на входе в зону работы пробоотборных устройств равна скорости потока жидкости в данной точке отбора пробы. Линии тока жидкости искривляются, если скорость жидкости в пробоотборнике и скорость в основном потоке не совпадают. Появляется ошибка при отборе проб вследствие того, что частицы имеют реальную массу и объем и не могут соблюдать траекторию этих линий тока. При изокинетическом методе отбора проб следует основательно подходить к выбору скорости потока и диаметра сопла пробоотборника. Это заставляет конструировать пробоотборные устройства непосредственно к каждому жидкостным системам и агрегатам, загрязнения в которых необходимо контролировать.

Использование полнопоточных приспособлений пробоотбора является рациональным решением проблемы с низким показателем достоверности проведенных анализов. Для соблюдения достоверности результатов необходимо применять полнопоточные устройства отбора проб, когда полость пробоотборника требуемого нормативного объема в процессе функционирования контролируемой системы является ее частью в точке отбора, а на момент отбора пробы отсекается от потока (жидкость одновременно перенаправляется через байпасный участок трубопровода), извлекается из пробоотборника и направляется на анализ.

В данном случае пробоотборник может служить контейнером для транспортировки.

### 3. Заключение

Из-за того что не всегда есть возможность использовать прямой метод для анализа загрязнений жидкостных систем появляется необходимость пользоваться косвенным методом. Как следствие появляется потребность в как можно более точных результатах проведенных исследований. Именно эта задача и заставляет улучшать устройства и механизмы для взятия проб полонопоточного типа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белянин П. Н., Данилов В. М. Промышленная чистота машин. М. : Машиностроение, 1982. 224 с.
2. Сапожников В. М. Монтаж и испытание гидравлических и пневматических систем летательных аппаратов. М. : Машиностроение, 1979. 256 с
3. ГОСТ 28028-89. Промышленная чистота. Гидропривод. Общие требования и нормы. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. 26 с.
4. Производство гидрогазовых и топливных систем. Ч. 2. Монтаж, контроль и испытание гидрогазовых и топливных систем. Руководящие технические материалы РТМ-1.4.535-89. М. : НИАТ, 1991. 243 с.

#### MONITORING OF CONTAMINATION OF WORKING FLUIDS IN THE AIRCRAFT

*Vladimir Repin, Irina Maltseva, Natalia Kalikina, bachelor*

*Novosibirsk state technical University, 20 Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russia, tel. (383)346-06-09*

*Repin V.S., email [vovarepin1999@mail.ru](mailto:vovarepin1999@mail.ru)*

*Maltseva I.S., email [irinaa11101011@gmail.com](mailto:irinaa11101011@gmail.com)*

*Kalikina N.A., email [okutina.2017@stud.nstu.ru](mailto:okutina.2017@stud.nstu.ru)*

*Address for correspondence: Repin Vladimir,*

*Novosibirsk state technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20, tel. +7(913)728-71-1*

#### Abstract

The existing methods and means of monitoring the degree of contamination of the working fluid in various systems and units of aircraft ARE shown. The possibility of increasing the reliability of results control is presented.

**Keyword:** control, purity standard, sample, liquid system, aircraft.

# **СЕКЦИЯ: ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ МАШИН**

УДК 539.3

## **ПРИМЕНЕНИЕ МКЭ В ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НДС ПЛАСТИНЫ С ОТВЕРСТИЕМ**

*Артемьев Александр Евгеньевич*

Новосибирский государственный технический университет, 630073,  
Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (383)346-31-21

*Артемьев А. Е.*, email [a.e.artemyev@yandex.ru](mailto:a.e.artemyev@yandex.ru)

*Адрес для корреспонденции: Артемьев Александр Евгеньевич,*  
Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г.  
Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (383)346-31-21

### **Аннотация**

Представлен метод автоматической генерации сетки конечных элементов для односвязной двумерной области. Отверстие вычитается из построенной треугольной сетки. Для автоматической генерации сетки был использован фронтальный метод. Также представлен метод расчёта напряжённо-деформированного состояния по методу конечных элементов. При расчёте напряжённо-деформированного состояния глобальная матрица жёсткости и глобальный вектор узловых нагрузок собираются из локальных матриц жёсткости и векторов узловых нагрузок для каждого конечного элемента. Приведены примеры автоматической генерации сетки и сравнение с решениями ANSYS.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов; сетка элементов; триангуляция

### **1. Введение**

Метод конечных элементов (МКЭ) является широко распространённым на практике методом расчёта напряжённо-деформированного состояния конструкций. Цель данной работы – написать программу расчёта метода конечных элементов применительно к задачам расчёта плоского напряженного состояния пластины на примере наиболее распространённого трёхузлового конечного элемента.

### **2. Теория**

Фронтальный алгоритм заключается в том, что на границе области последовательно создаются новые треугольники, за счет этого недостроенная область постепенно сужается, а граница (список узлов) корректируется на каждом акте создания треугольника. На рис. 1 приведены примеры триангуляции.

Алгоритм формирования матрицы жесткости:

1. Сначала глобальная матрица жесткости заполняется нулями;
2. Выбираем конечный элемент номер один;
3. Вычисляется матрица жесткости для этого элемента;
4. Блоки матрицы жесткости элемента, учитывая номера узлов составляющих конечный элемент, прибавляются к соответствующим элементам глобальной матрицы жесткости;
5. Номер элемента увеличивается на единицу и всё повторяется.

Вектор нагрузки для всей системы происходит аналогично формированию матрицы жёсткости. Рассмотрим вычисление вектора нагрузки для элемента (вектор нагрузки вычисляется только для тех элементов, к которым приложена нагрузка).

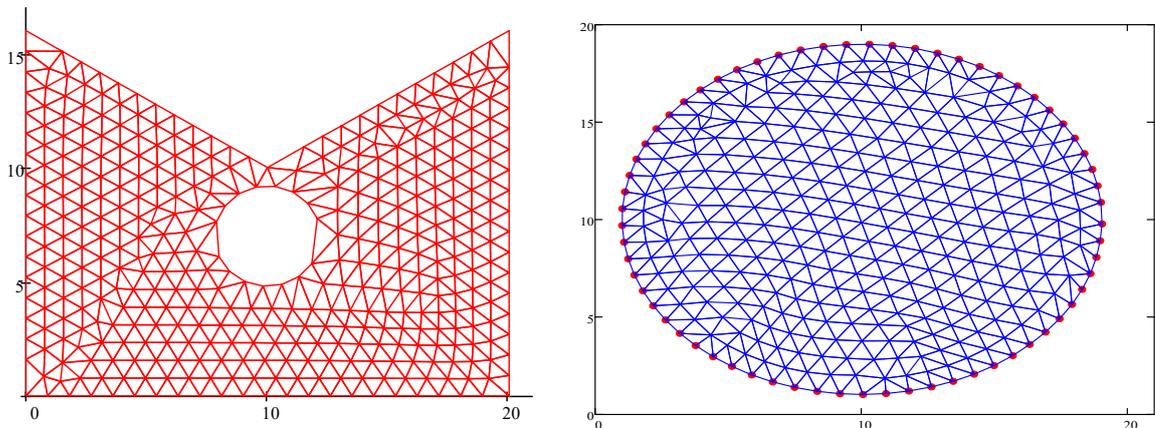


Рис. 1. Примеры треугольной сетки

### 3. Результаты

Ниже приведено сравнение результатов перемещения угловых точек пластины, изображённой на рис.2, рассчитанной в данной программе и в ANSYS.

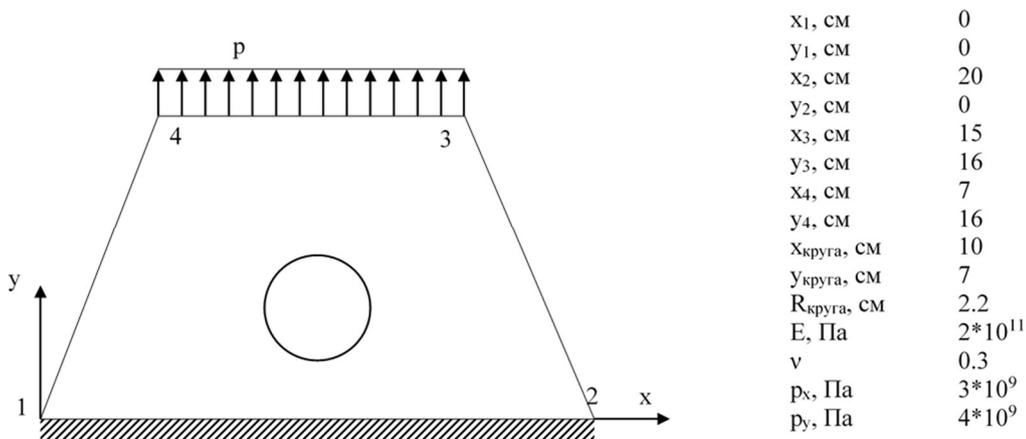


Рис. 2. Расчетная схема

Расчёт этой пластины в программе ANSYS WORKBENCH, дал следующие перемещения точек:  $9.1867 \cdot 10^{-9}$  м для точки №3 и  $9.4996 \cdot 10^{-9}$  м

для точки №4. Погрешность с результатами ANSYS составляют 0.46% и 0.17% для точек №3 и №4 соответственно.

#### **4. Выводы**

Поставленная задача о напряженно-деформированном состоянии пластины решена методом конечных элементов, с использованием принципа возможных перемещений, который позволяет рассчитывать на статическую и динамическую прочность любые конструкции. Проведен анализ о прочностных свойствах рассматриваемой пластины, получены генератор треугольной сетки, матрица жесткости, вектор узловых нагрузок и вектор перемещений пластины. Все расчеты выполнены с помощью программы написанной в Mathcad.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Присекин В.Л., Расторгуев Г.И. Основы метода конечных элементов в механике деформируемых тел: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2010. – 238 с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

#### **APPLICATION OF FEM IN THE PROBLEM OF DETERMINING THE STRESS-STRAIN STATE OF A PLATE WITH A HOLE**

*Artemyev Alexander Yevgenyevich*

Novosibirsk state technical University, 20 Karl Marx Ave., Novosibirsk,  
630073, Russia, tel. +7(383)346-31-21

*Artemyev A. E.*, email [a.e.artemyev@yandex.ru](mailto:a.e.artemyev@yandex.ru)

**Abstract:** The problem of the stress-strain state of the plate is solved by the finite element method, using the principle of possible displacements, which allows you to count on the static and dynamic strength of any structure. An analysis of the strength properties of the plate under consideration is performed, and a triangular grid generator, a stiffness matrix, a nodal load vector, and a plate displacement vector are obtained. All calculations are performed using a program written in Mathcad. A method for automatically generating a finite element grid for a simply connected two-dimensional domain is presented. The hole is subtracted from the constructed triangular grid. The front-end method was used for automatic grid generation. A method for calculating the stress-strain state using the finite element method is also presented. When calculating the stress-strain state, the global stiffness matrix and the global nodal load vector are collected from local stiffness matrices and nodal load vectors for each finite element. Examples of automatic grid generation and comparison with ANSYS solutions are given.

**Keywords:** finite element method; element grid; triangulation

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УПРУГОЙ КОНСТРУКЦИИ

*Белова Екатерина Александровна, магистрант; Белоусов Анатолий  
Иванович, к.т.н., доцент*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия,  
г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (383)346-31-21

*Белова Е. А.*, e-mail [katyaqqq98@gmail.com](mailto:katyaqqq98@gmail.com)

*Белоусов А. И.*, e-mail [a.belousov@corp.nstu.ru](mailto:a.belousov@corp.nstu.ru)

*Адрес для корреспонденции: Белоусов Анатолий Иванович, Новосибирский  
государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр.  
Карла Маркса, 20, тел. (383)346-31-21*

### **Аннотация**

Для выполнения работы была взята упругая конструкция в виде консольно-закреплённой трубы. Труба выполнена из стали и приварена к металлической пластине закреплённая на силовом полу. Для данной конструкции были найдены собственные частоты и собственные формы колебания. В процессе работы использовался аналитический расчёт с использованием функций Крылова и метод конечных элементов. Эксперимент был проведён с использованием ударного молотка и LMS Scadas Mobil с двумя слотами. Полученные значения были обработаны в пакете программ MathCad. При сопоставлении теоретических и экспериментальных результатов разница значений составила ~ 6%, что находится в пределах допустимой погрешности.

**Ключевые слова:** динамические характеристики; собственные формы; собственные частоты; экспериментальное исследование

### **1. Введение**

Результаты определения динамических характеристик, вычисленных теоретическими методами, далеко не всегда соответствуют экспериментальным результатам. Чаще всего дело в неточности математической модели, выбранной для определения динамических характеристик. Поэтому необходимо проведение экспериментов, которые позволяют, во-первых, определить реальные характеристики, во-вторых, вводить коррективы в математические модели.

Осуществить методы исследования динамических свойств можно при помощи специального оборудования. Существует два класса устройств - прикрепляемые и неприкрепляемые вибровозбудители такие как: электромагнитные вибрационные стенды, электрогидравлические вибрационные стенды, вибраторы с эксцентрическими вращающимися массами; молотки, разноразмерные маятниковые ударные молоты, подвесные кабели для создания сотрясений опытных конструкций [1].

При анализе мод колебаний часто используется метод ударного возбуждения. Переходный кратковременный процесс передачи энергии возникает при ударе и представляет собой колебания. Форма спектра зависит не только от массы и жесткости модального молотка, а также подвергающейся ударам конструкции. Чем меньше жесткость молотка, тем меньше значение амплитуды колебаний.

Целью работы является получение опыта проведения и обработки результатов эксперимента по определению динамических свойств упругой конструкции. Для эксперимента выбрана простейшая конструкция: консольно-закрепленная труба. Результаты исследований, полученных экспериментальным путем, необходимо сопоставить с теоретическим решением.

## 2. Аналитическое решение

Для консольно-закрепленной трубы необходимо определить модальные характеристики: собственные частоты, собственные формы колебаний.

Исходная конструкция представляет собой прямоугольную стальную трубу с геометрическими характеристиками сечения  $20 \times 40 \times 1.5$  мм и длиной 3 м рис.1. Труба точно приварена к металлической пластине, а пластина закреплена на силовом полу. Исходные данные предоставлены в таблице 2.1.

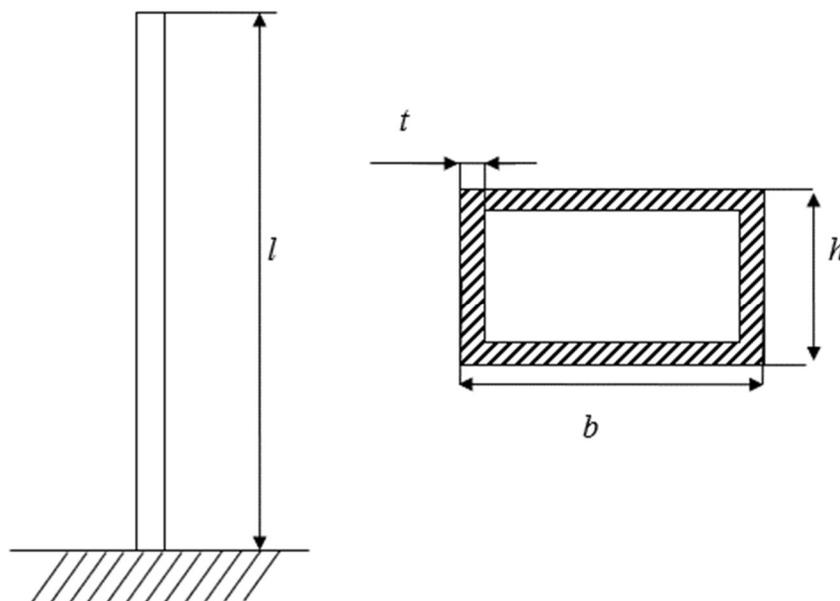


Рис. 1. Объект расчёта

## Исходные данные

Характеристика	Высота $l$ , м	Толщина стенки $t$ , м	Высота сеч. внеш. $h$ , м	Ширина сеч. внеш. $b$ , м	Модуль упругости $E$ , МПа	Коэффициент Пуассона, $\mu$	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Значение	3	0.0015	0.02	0.04	$2.1 \cdot 10^5$	0.28	7850

Анализ частот и форм поперечных колебаний балки постоянного сечения будет выполнен с помощью аналитического подхода. Для рассматриваемой консольно-закрепленной балки уравнение для определения форм  $y(x)$  собственных колебаний имеет вид (1)

$$y^{IV} - k^4 y = 0, \text{ где } k^4 = \frac{\rho F}{EI} \omega^2 \quad (1)$$

Функции формы определяются как решение приведенного уравнения вида (2) и через функции Крылова, записанных в виде (3). Константы найдем из граничных условий.

$$y(x) = C_1 \cos(kx) + C_2 \sin(kx) + C_3 \operatorname{ch}(kx) + C_4 \operatorname{sh}(kx) \quad (2)$$

$$S(x) = \frac{1}{2} [\operatorname{ch}(kx) + \cos(kx)] \quad U(x) = \frac{1}{2} [\operatorname{ch}(kx) - \cos(kx)] \quad (3)$$

$$T(x) = \frac{1}{2} [\operatorname{sh}(kx) + \sin(kx)] \quad V(x) = \frac{1}{2} [\operatorname{sh}(kx) - \sin(kx)]$$

Через тригонометрические и гиперболические функции это уравнение приводится к виду (4).

$$\cos(kl) \cdot \operatorname{ch}(kl) - 1 = 0 \quad (4)$$

Вычисленные первые три ненулевых корня  $kl$  и физические параметры позволяют определить частоты конкретной балки и построить собственные формы (рис.2)

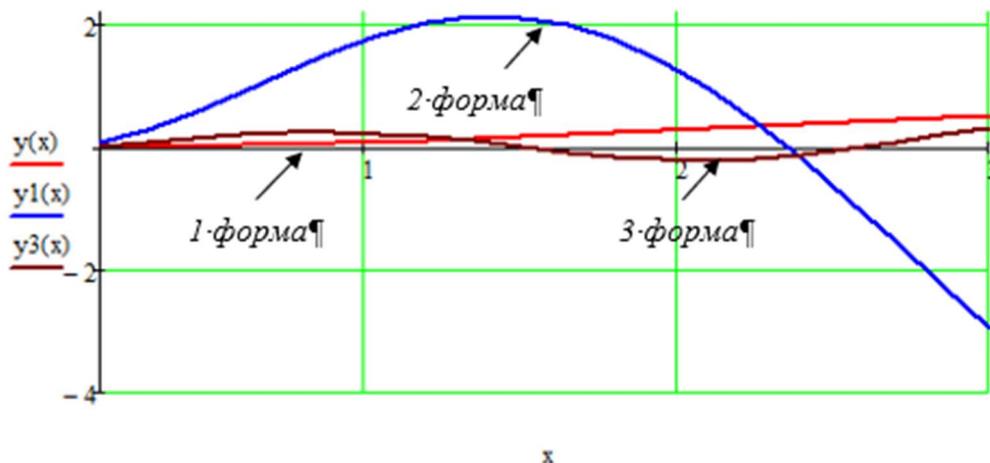


Рис. 2. Собственные формы консольно-закрепленной трубы

### 3. Методика экспериментального исследования ударного возбуждения

Для эксперимента используется следующее оборудование:

- программное обеспечение для
- USB ключ для защиты доступа к ПО.
- Ударный молоток для модальных испытаний
- Кабель малошумящий антивибрационный
- Высокочувствительный ICP акселерометр для модальных испытаний
- Кабель малошумящий антивибрационный
- LMS Scadas Mobil с двумя слотами: контроллер XSI и восьми канальный входной модуль.

Технология проведения модального эксперимента состоит в периодическом возбуждении колебаний конструкции с помощью ударов по ней модальным молотком, последовательной записи временного сигнала возбуждения и должного фиксирования отклика конструкции с помощью акселерометра. При модальном эксперименте применяется метод фиксированного датчика. В этом случае отклик фиксируется в одной точке при нескольких точках возбуждения.

Экспериментальная установка представлена на рис.3.

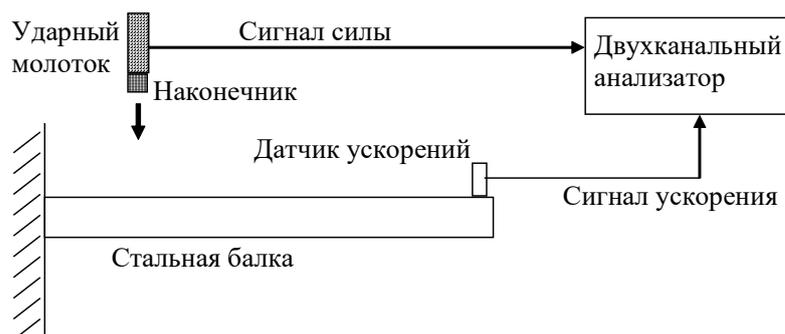


Рис. 3. Схема эксперимента

Полученные данные необходимо обработать в MathCAD. Собственные формы консольно-закрепленной трубы представлены на рис.4-6.

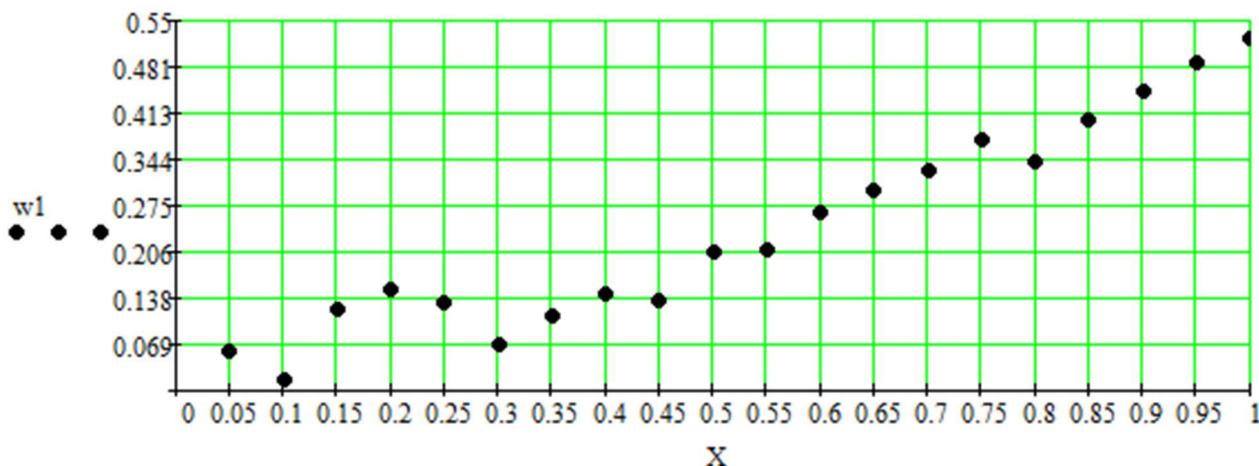


Рис. 4. Первая собственная форма колебаний консольно-закрепленной трубы

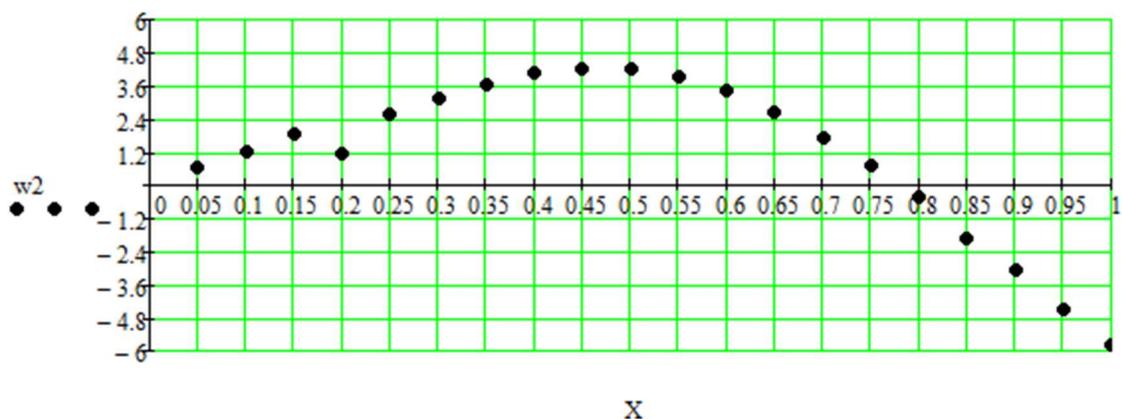


Рис. 5. Вторая собственная форма колебаний консольно-закрепленной трубы

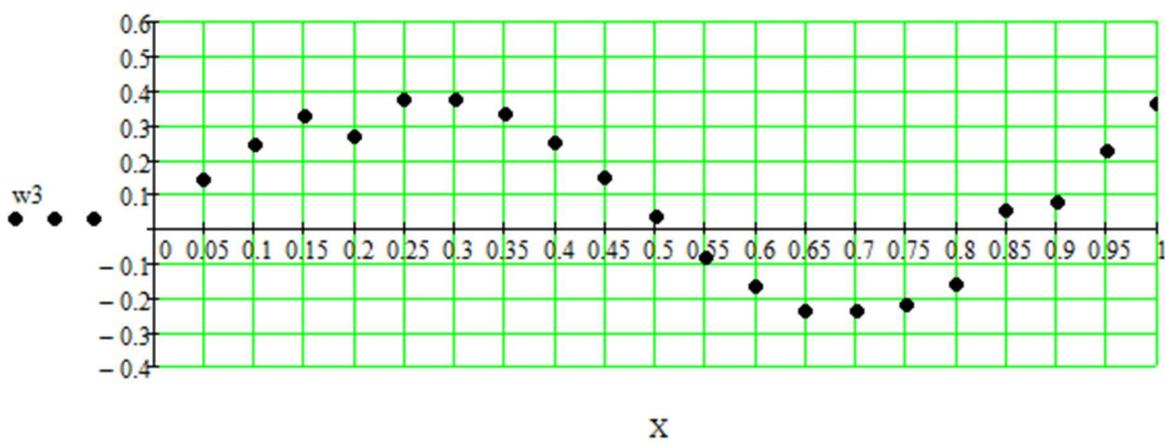


Рис. 6. Третья собственная форма колебаний консольно-закрепленной трубы

#### 4. Сравнение результатов, полученных теоретическим и экспериментальным методом

Все полученные значения частот представлены в таблице 2.

Из полученных данных видно, что экспериментальные частоты равняются меньшим значениям, чем рассчитанные при помощи аналитического расчета, их погрешность не превышает 6%. Причиной отличия резонансных частот могут являться фоновый шум, также консольное закрепление трубы, но исходя из нескольких экспериментов нельзя точно утверждать, что это могло повлиять на полученные данные.

Таблица 2

Сопоставление результатов

Номер частоты	Значение частот, Гц		Разница, %
	Аналитическое решение	Экспериментальное исследование	
1	2.639	2.501	5.518
2	16.541	16.254	1.766
3	46.314	45.011	2.895

Для сравнения производится сопоставление теоретической функции формы и экспериментальной функции формы, при этом необходимо строить формы в том же масштабе что и экспериментальную форму. Масштаб теоретической формы зависит от множителя  $C$  в уравнение формы:

$$y\left(\frac{x}{l}\right) = C \left[ U((kl)_i) \frac{x}{l} - \frac{S(kl)_i}{T(kl)_i} V((kl)_i) \frac{x}{l} \right]$$

Множитель  $C$  вычисляется по методу наименьших квадратов:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^m y_i v_i}{\sum_{i=1}^m y_i^2}$$

Сравнение собственных форм консольно-закрепленной трубы предоставлены на рис.7 - 9.

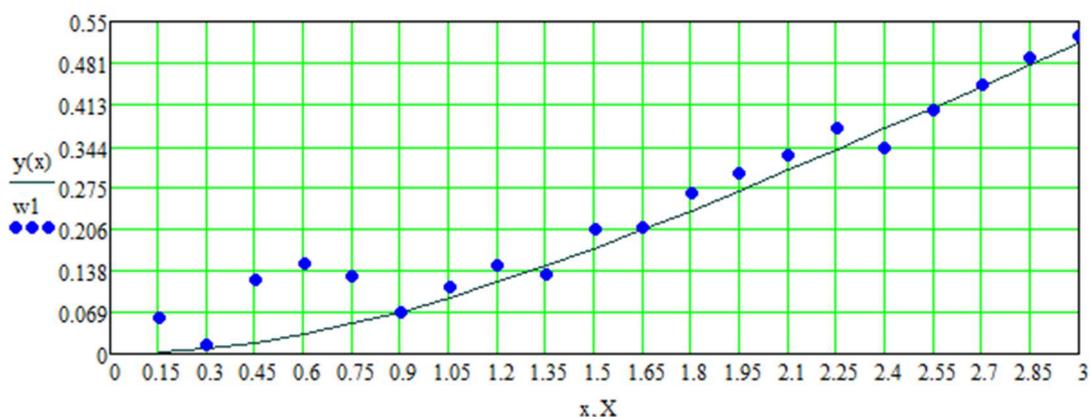


Рис. 7 Сравнение первой собственной формы консольно-закрепленной трубы, полученное аналитическим и экспериментальным методом

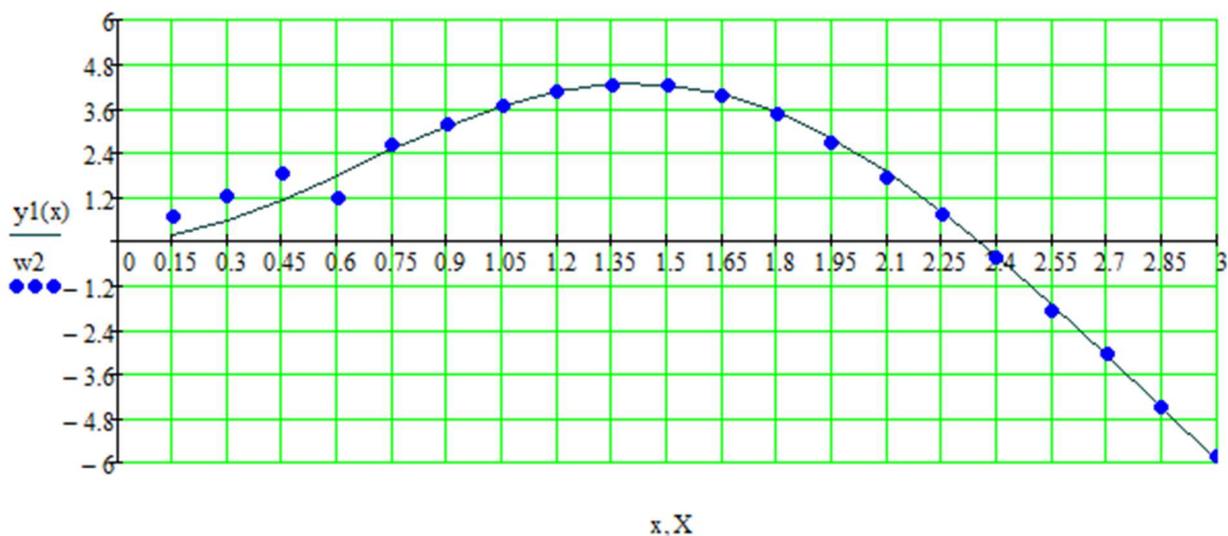


Рис. 8 Сравнение второй собственной формы консольно-закрепленной трубы, полученное аналитическим и экспериментальным методом

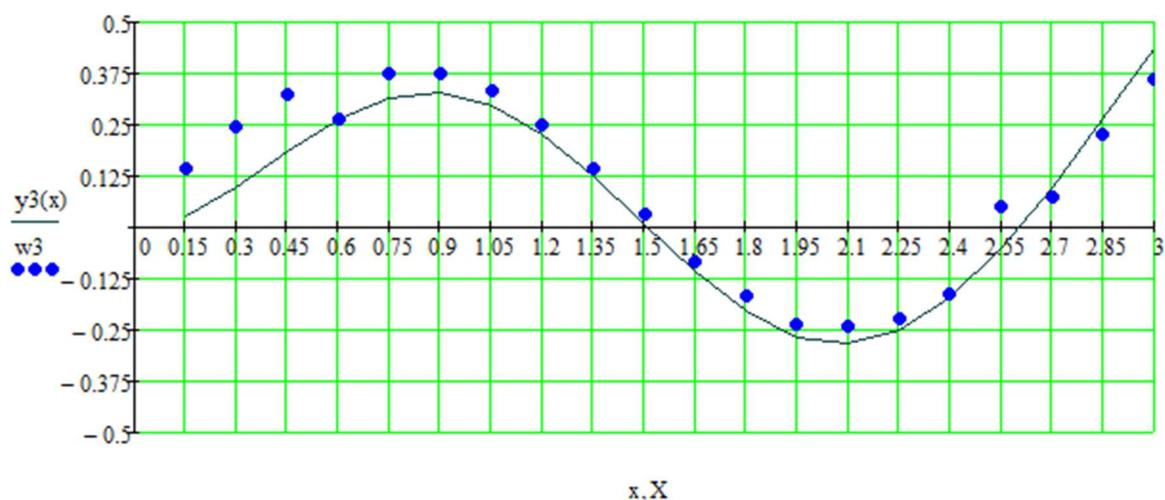


Рис. 9 Сравнение третьей собственной формы консольно-закрепленной трубы, полученные аналитическим и экспериментальным методом

### 3. Выводы

В результате проведения эксперимента и теоретических расчетов работы, были получены навыки в решении задач по проведению модального анализа выбранного объекта исследования – консольно-закрепленной трубы.

Для теоретического метода использовался аналитический расчет с использованием функций Крылова.

Отдельное внимание было уделено изучению порядку проведения эксперимента, а также описанию работы с установкой оборудования Scadas Mobile и программным обеспечением LMS Test.Express. Данные полученные экспериментально были обработаны с помощью математического пакета программ MathCAD.

Для полученных результатов с помощью теоретического и экспериментального методов стало сопоставление динамических характеристик – собственных частот и форм колебаний.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оле Дэссинг, Брюль и Кьер. Испытания конструкций. Часть 1. Измерения механической подвижности. Изд-во: «Брюль и Кьер», 1989. - 46 с.
2. Оле Дэссинг, Брюль и Кьер. Испытания конструкций. Часть 2. Анализ мод колебаний и моделирование. Изд-во: «Брюль и Кьер», 1989. - 71 с.
3. Биргер И. А., Пановко Я. Г. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трёх томах. Том 3. Москва: «Машиностроение» – 1949. – 547 с.
4. Леонтьев Н.В. Применение системы ANSYS к решению задач модального и гармонического анализа. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Информационные системы в математике и механике». Нижний Новгород, 2006, 101 с.
5. Шакирзянов Р.А., Шакирзянов Ф.Р. Динамика и устойчивость сооружений: Учебное пособие. – 2-е перераб. изд. / Р.А. Шакирзянов, Ф.Р. Шакирзянов. – Казань: Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2015. – 120 с.

6. Бабаков И.М. Теория колебаний. – Москва, 1968 – 517 с.
7. Бернс В.А. Экспериментальный модальный анализ летательных аппаратов.– Новосибирск, 2017 – 160 с.
8. Прокофьев А.Б Проведение измерений виброакустических характеристик с использованием LMS Scadas Mobile.– Самара, 2010 – 45 с.

## EXPERIMENTAL AND THEORETICAL DETERMINATION OF DYNAMIC PROPERTIES OF AN ELASTIC STRUCTURE

*Belova Ekaterina A., master's degree student; Belousov Anatoly I., associate professor*

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa., Novosibirsk, 630073, Russia, tel. +7 (383)346-31-21

*Belova E. A.*, e-mail [katyaqqq98@gmail.com](mailto:katyaqqq98@gmail.com)

*Belousov A. I.*, e-mail [a.belousov@corp.nstu.ru](mailto:a.belousov@corp.nstu.ru)

### Abstract

To perform the work, an elastic structure was taken in the form of a cantilever-fixed pipe. The pipe is made of steel and is welded to a metal plate fixed on the power floor. Eigenfrequencies and eigenforms of oscillation were found for this construction. In the course of the work, an analytical calculation using Krylov functions and the finite element method were used. The experiment was conducted using an impact hammer and LMS Scadas Mobil with two slots. The obtained values were processed in the MathCad software package. When comparing the theoretical and experimental results, the difference in values was ~ 6%, which is within the margin of error.

**Keywords:** dynamic characteristics; natural shapes; natural frequencies; experimental study

УДК 539.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ПЛАСТИНОК

*Матвеев Константин Александрович, д.т.н., профессор; Селиванов Юрий Сергеевич, магистрант*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г.Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

*Матвеев К.А.*, email [matveev@corp.nstu.ru](mailto:matveev@corp.nstu.ru)

*Селиванов Ю.С.*, e-mail [selivanov.2016@stud.nstu.ru](mailto:selivanov.2016@stud.nstu.ru)

## **Аннотация**

В данной работе были проведены исследования напряженного состояния многослойных пластин, каждый слой которых представляет собой композитный материал. Слои в пластине имеют одинаковый композитный материал, но отличаются направлением укладки волокон. Слои уложены с шагом в 45 градусов. Результат представлен в виде графиков напряжений по толщине пластины и обобщения данных графиков.

**Ключевые слова:** композитные материалы, напряжение, напряженное состояние, исследование напряженного состояния

Одним из приоритетных направлений разработки в области материалов являются композитные материалы. Таковыми можно назвать, к примеру пластину, состоящую из двух разных металлов, но здесь речь идет о современных композитах, к примеру таких, как плетенные из карбоновых волокон слоистые материалы. Данные материалы, а соответственно и какие-либо конструкции из них имеют большие перспективы, так как они отличаются высокой локальной прочностью, а также сравнительно более легким весом, что позволяет строить те же конструкции, но уже делать их облегченными, а также экономически доступными. Целью данного исследования является определение напряженно-деформированного состояния многослойной пластины, состоящей из композитных материалов, определение мест наибольшей концентрации напряжений, а также распределения напряжений послойно. Распределения напряжений в данных конструкциях позволяет понять, каким образом будет происходить разрушение. Исследования в данной области уже проводились, например в трудах [6].

Для расчета напряженно-деформированного состояния многослойных, в нашем случае трехслойных, пластин был использован программный пакет Ansys Workbench. Исследуется трехслойная пластина, состоящая из ортотропных композитных материалов, жестко закрепленная с одной стороны и нагружаемая равномерно распределенной нагрузкой с другой. Слои армированы следующим образом: [45,0,-45]. Материал всех слоев одинаков, отличается только направление армирования. В данном исследовании нас интересует картина напряженного состояния, а следовательно, нас не интересует численное значение напряжений, а также характеристики материала и значение нагрузки.

Искомое напряженное состояние будем рассматривать по толщине пластины в центре пластины во избежание краевого эффекта, от слоя к слою. Для более наглядного представления мы увеличим толщину слоев, а также количество конечных элементов по толщине слоя. Таким образом, модель пластины будет выглядеть как указано на рисунке 1.

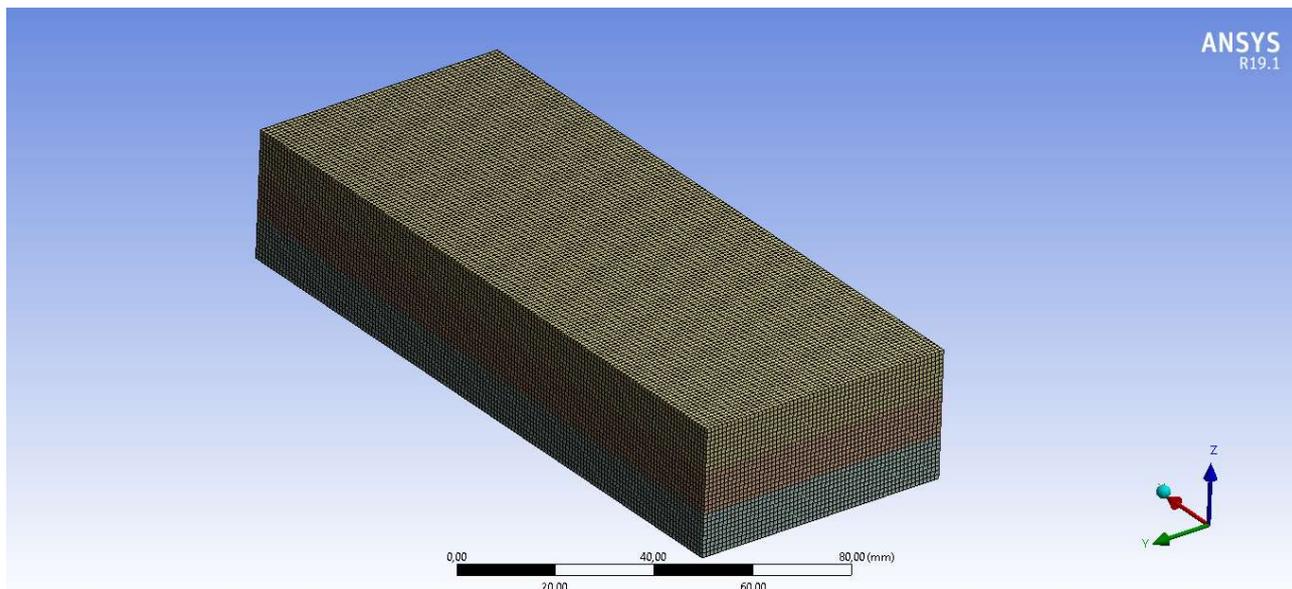


Рис. 1. Конечно-элементная модель пластины

Таким образом, на каждый слой мы имеем по толщине 10 конечных элементов. Ниже, на рисунках 2 – 4 представлены 6 компонент тензора напряжений. Размерность на рисунках по оси ординат МПа, по оси абсцисс миллиметры.

Таким образом в общем виде мы имеем одноосное растяжение и как видим на рисунке 2 напряжение  $\sigma_{11}$  выглядит неоднозначно. Мы видим, что в среднем слое возникают самые большие напряжения в отличие от остальных слоев, а в верхнем и нижнем слоях достаточно малы в сравнении со средним слоем. С напряжениями  $\sigma_{22}$  ситуация в точности наоборот, верхний и нижний слои имеют весомые значения по сравнению со средним слоем, в нем напряжения малы. Также мы отчетливо видим, что по толщине слоя, примерно в его середине, напряжения меняют свой знак, таким образом можно сделать вывод о том, что помимо растягивающих напряжений мы имеем также и сжимающие. Переходы напряжений от слоя к слою достаточно резки. Что касается напряжений  $\sigma_{33}$ , то прекрасно видно, как по толщине пластины напряжения возрастают до середины среднего слоя и вновь начинают убывать к верхнему краю. На рисунках 3 и 4 мы видим распределение касательных напряжений, полученных для данной трехслойной пластины. Также можно определить, какую долю напряжения составляют от приложенной нагрузки, которая в данном случае равно 5.6 МПа. Для нормальных напряжений  $\sigma_{11}$  мы видим, что напряжения в среднем слое превышают приложенную нагрузку практически в 2 раза, в то время, как остальные компоненты  $\sigma_{22}$  и  $\sigma_{33}$  составляют довольно-таки малую долю от приложенной нагрузки. Касательные напряжения на порядок меньше нормальных, следовательно, составляют малую долю от приложенной нагрузки. Касательные напряжения в плоскости

пластины по своим значениям соизмеримы с нормальными, тем самым в следствии сдвига между слоями может возникнуть разрушение клеевого слоя.

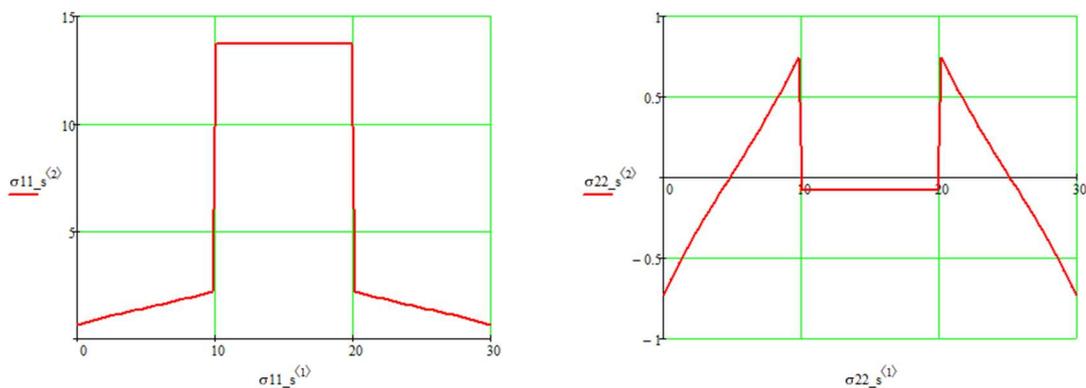


Рис. 2. Компоненты напряжений  $\sigma_{11}$  и  $\sigma_{22}$

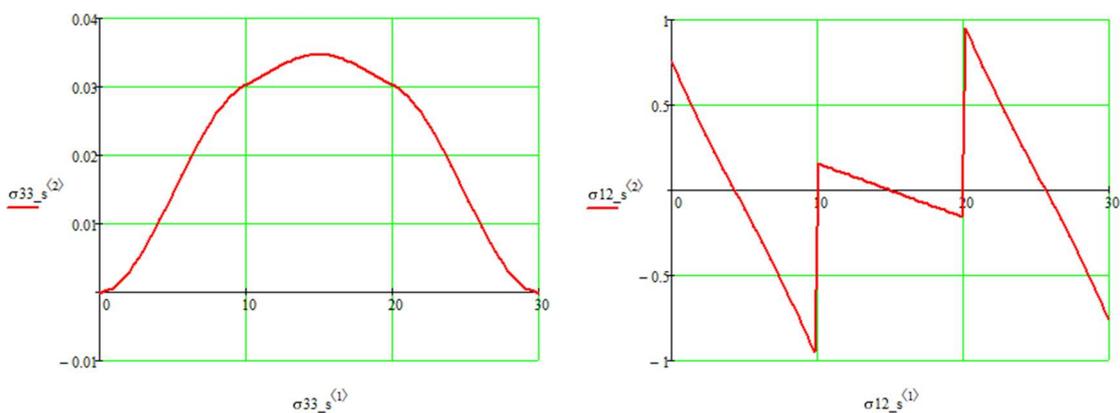


Рис. 3. Компоненты напряжений  $\sigma_{33}$  и  $\sigma_{12}$

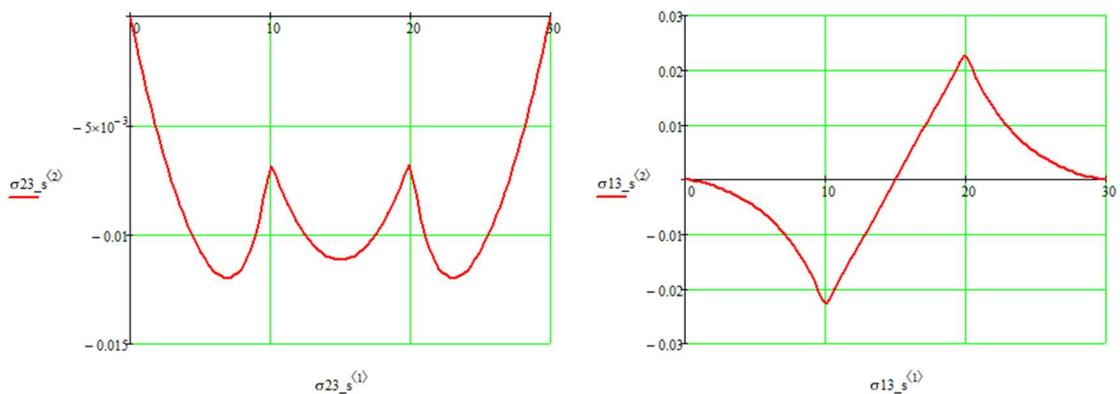


Рис. 4. Компоненты напряжений  $\sigma_{23}$  и  $\sigma_{13}$

В ходе данного исследования была получена картина напряженного состояния композитного материала в виде трехслойной пластины для случая одноосного растяжения. Для получения напряженного состояния был изучен и использован метод конечных элементов, интерпретированный в программном пакете Ansys Workbench.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бруяка В.А. Инженерный анализ в Ansys Workbench Часть I. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.: ил.
2. Присекин В.Л., Расторгуев Г.И. Основы метода конечных элементов. Учебное пособие – Новосибирск, Изд-во НГТУ. - 2003. – 124 с.
3. Максименко В.Н., Олегин И.П., Пустовой Н.В. Методы расчета на прочность и жесткость конструкций из композитов: учебник. – Новосибирск, Изд-во НГТУ. – 2015. – 424с.
4. Батаев А.А., Батаев В.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: Учебник. – Новосибирск, Изд-во НГТУ. – 2002. – 384с.
5. Труды XIV Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона»; Новосиб. гос. техн. ун-т, - Новосибирск, 2013.

## INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF MULTILAYER COMPOSITE WAFERS

*Konstantin Aleksandrovich Matveev, D.Sc, Professor; Yuri Sergeyevich Selivanov, Graduate students, Master's Degree student*

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 Karl Marx Ave.

*Matveev K.A.*, email [matveev@corp.nstu.ru](mailto:matveev@corp.nstu.ru)  
*Selivanov Y.S.*, e-mail [selivanov.2016@stud.nstu.ru](mailto:selivanov.2016@stud.nstu.ru)

### Abstract

In this work the stress state of multilayer plates, each layer of which is a composite material, was investigated. Layers in the plate have the same composite material, but differ in the direction of fiber placement. Layers are stacked in 45 degree steps. The result is presented in the form of stress diagrams for the thickness of the plate and generalization of these diagrams.

### Keywords

Composite materials, stress, stress state, stress state study

## УСТОЙЧИВОСТЬ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ОРТОТРОПНЫХ ПЛАСТИН

*Михайлова Ольга Александровна, магистрант; Матвеев Константин Александрович, д.т.н., профессор*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (383)346-31-21

*Михайлова О. А.*, e-mail [olya31122011@yandex.ru](mailto:olya31122011@yandex.ru)

*Матвеев К. А.*, e-mail [matveev@corp.nstu.ru](mailto:matveev@corp.nstu.ru)

*Адрес для корреспонденции: Матвеев Константин Александрович,*  
Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (383)346-31-21

### Аннотация

В данной статье описан метод расчета прямоугольной ортотропной пластины на устойчивость. Метод заключался в применении энергетического критерия устойчивости, а именно функционала Брайана. Для решения функционала Брайана использовался метод Ритца. Его идея состоит в аппроксимации варьируемых функций функциональными рядами, каждый из которых заранее удовлетворяет заданным граничным условиям. В качестве рассчитываемой модели выступала прямоугольная пластина с произвольной ориентацией осей ортотропии. Расчеты проводились в программе MathCad и программном комплексе SolidWorks. Также были проанализированы результаты расчетов и получен ответ на вопрос, при каком значении угла армирования  $\phi$  заданная пластина будет иметь наибольшую критическую нагрузку.

**Ключевые слова:** устойчивость, ортотропный материал, энергетический критерий, метод Ритца, метод конечных элементов, функционал Брайана, стеклопластик

### 1. Введение

В конструкциях летательных аппаратов именно тонкостенные элемент могут обеспечить удачное сочетание лёгкости конструкции и высокой удельной прочности. Прогнозирование устойчивости тонкостенных элементов конструкции при проектировании является особенно важным. Целью данной статьи является определение параметра критической нагрузки прямоугольной ортотропной пластины, изготовленной из стеклопластика.

## 2. Теория

Запишем функционал (1), который определяет приращение полной свободной энергии пластины при переходе к изогнутому состоянию, т.е. функционал Брайана:

$$I[u_3] = W + \frac{1}{2} \int_{\Omega} T_{ij}^0 u_{3,i} u_{3,j} d\Omega \quad (1)$$

Функционал Брайана задан на множестве функций прогибов  $u_3(x_1, x_2)$ , которые заранее удовлетворяют кинематическим граничным условиям. Параметрами, которые определяются из решения задач об обобщенном плоском напряженном состоянии, являются погонные напряжения  $T_{ij}^0$ .

Критическим является минимальный уровень внешней нагрузки, при котором вариационное уравнение (2) имеет нетривиальное решение:

$$\delta I[u_3; T_{ij}^0] = 0 \quad (2)$$

## 3. Постановка задачи

Имеется прямоугольная пластина, изображенная на рисунке 1. Пластина с произвольной ориентацией осей ортотропии нагружена в своей плоскости нагрузками  $q$  и  $p$ . Отсутствие прогибов пластины срединной поверхности описывает плоское состояние равновесия пластины. Существование изогнутой формы равновесия возможно при некотором значении внешней нагрузки. Это критическое значение внешней нагрузки находится энергетическим критерием устойчивости.

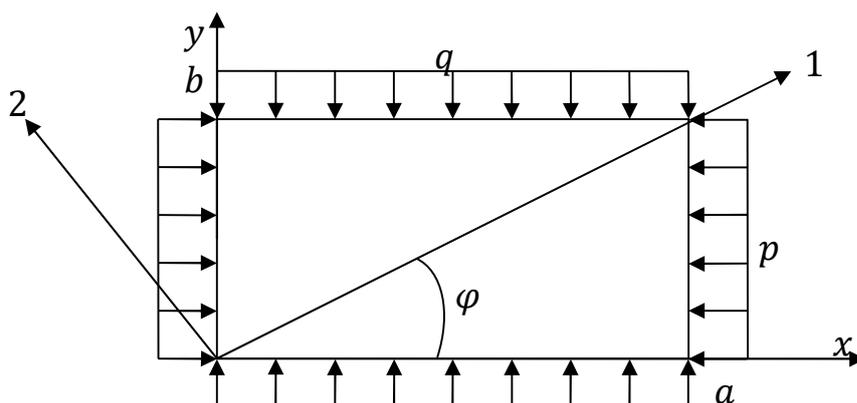


Рис. 1. Расчетная схема

Для нашей задачи в системе координат  $(x, y)$  энергетический критерий Брайана будет иметь следующий вид:

$$I = \frac{\pi^4 \sqrt{D_1 D_2}}{2a^2} B_{ij}^2 \left[ \bar{A}_1 \frac{1}{4\Delta} i^4 + \bar{A}_2 \frac{\Delta^3}{4} j^4 + \bar{A}_3 \frac{\Delta}{2} i^2 j^2 + \bar{A}_4 \frac{\Delta}{4} i^2 j^2 - \frac{1}{4} \lambda (i^2 \Delta + \xi j^2 \Delta^3) \right]$$

где  $\bar{A}_i, \bar{D}_k$  - безразмерные жесткости;  $\lambda, \eta$  - параметры внешней нагрузки;  $\xi$  - отношение внешних нагрузок;  $\Delta$  - отношение сторон пластины.

В критическом состоянии должны выполняться условия экстремума функции  $\frac{\partial I}{\partial B_{ij}} = 0; i, j = 1, 2, \dots$ . Из условия нетривиальности решения  $B_{ij} \neq 0$  уравнений находим  $\lambda$ :

$$\lambda = \bar{A}_1 \frac{i^4}{\Delta^2 (i^2 + \xi j^2 \Delta^2)} + \bar{A}_2 \frac{\Delta^2 j^4}{(i^2 + \xi j^2 \Delta^2)} + (2\bar{A}_3 + \bar{A}_4) \frac{i^2 j^2}{(i^2 + \xi j^2 \Delta^2)}$$

где  $i$  - число полуволн в пластине в направлении оси  $x$  при потере устойчивости;  $j$  - число полуволн в пластине в направлении оси  $y$  при потере устойчивости. Из полученной функции можно найти наименьшее значение  $\lambda = \lambda_{кр}$  при интересующих геометрических параметрах пластины, изготовленной из интересующего материала, которое будет являться критическим параметром внешней нагрузки.

#### 4. Численные результаты

Были найдены параметры нагрузки  $\lambda$  от разных углов армирования в MathCad и SolidWorks. Результаты представлены в таблице 1, а также подсчитана погрешность.

Таблица 1

Результаты расчетов прямоугольной пластины, изготовленной из  
стеклопластика

Угол армирования $\varphi$	Результаты расчета в MathCad	Результаты расчета в SolidWorks	Погрешность расчетов $\eta$
	$\lambda_{кр M}$	$\lambda_{кр S}$	
$0^0$	6.969	7.2583	3.986
$30^0$	11.778	11.121	5.908
$45^0$	13.41	12.355	8.539
$60^0$	11.609	11.124	4.36
$90^0$	6.897	6.8017	1.401

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеев К. А., Пустовой Н. В. Вариационные методы исследования устойчивости анизотропных пластин при температурно-силовом нагружении: Монография – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – 368 с.
2. Атфутов Н. А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. – М.: Машиностроение, 1978. – 312 с.
3. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем. – М.: Наука, 1967. – 984 с.

4. Лехницкий С. Г. Теория упругости анизотропного тела. – М.: Наука, 1977. – 416 с.
5. Пустовой Н. В., Матвеев К. А. Основы расчета на устойчивость деформируемых систем: учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017 – 372 с.

## STABILITY OF RECTANGULAR ORTHOTROPIC PLATES

*Mikhailova Olga A., master's degree student; Matveev Konstantin A., D.Sc. (Engineering), Professor*

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia, tel. +7(383)346-31-21

*Mikhailova Olga A.*, e-mail [olya31122011@yandex.ru](mailto:olya31122011@yandex.ru)

*Matveev Konstantin A.*, e-mail [matveev@corp.nstu.ru](mailto:matveev@corp.nstu.ru)

### Abstract

This article describes a method for calculating stability of a rectangular orthotropic plate. The method consists in the application of the energy stability criterion, namely the Brian functional. The Ritz method is used to solve the Brian functional. His idea is to approximate the varied functions by functional series, each of which satisfies the given boundary conditions in advance. The calculated model was a rectangular plate with an arbitrary orientation of the orthotropic axes. The calculations are carried out in the MathCad software and the SolidWorks software package. Also, the results of calculations are analyzed and an answer was obtained to the question at what value of the reinforcement angle  $\varphi$  a given plate would have the greatest critical load.

**Keywords:** stability, orthotropic material, energy criterion, Ritz method, finite element method, Brian functional, fiberglass

УДК 62-254

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ МАХОВОГО КОЛЕСА

*Мосиенко Дмитрий Сергеевич, магистрант; Пель Александр Николаевич, канд. техн. наук*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (383)346-31-21

*Мосиенко Д. С.*, email [mosienko.2016@stud.nstu.ru](mailto:mosienko.2016@stud.nstu.ru)

*Пель А. Н.*, e-mail [pel@corp.nstu.ru](mailto:pel@corp.nstu.ru)

## Аннотация

Основной характеристикой махового колеса является момент инерции. При проектировании его конструкции возникает проблема рационального распределения материала. Для снижения массы детали необходимо создать оптимальную конструкцию. При этом технические и эксплуатационные требования должны быть выполнены. В данной работе произведен расчёт топологической оптимизации конструкции маховика методом конечных элементов. На его основании спроектирована конструкция махового колеса. Расчёт выполнен в программном пакете Siemens solid edge 2020.

**Ключевые слова:** момент инерции относительно оси вращения вала; метод конечных элементов; топологическая оптимизация; частота вращения; целевая функция.

Одним из основных параметров маховика является его момент инерции относительно оси вращения вала. Данная величина является обязательной для соблюдения в проектируемой конструкции. Самый простой способ увеличения момента инерции — это увеличение массы изделия. Однако при ограничениях на массу конструкции и условий прочности в рамках ограниченных габаритов возможны различные варианты проектирования детали. При этом для уменьшения затрат на производство стремятся снизить массу изделия.

Таким образом, возникает потребность в оптимизации распределения массы внутри предоставляемой области проектирования для достижения заданных технических условий.

Аналитическими методами возможно спроектировать диск переменной толщины. Но такая конструкция будет строго осесимметричной [1, с. 317-327], [2]. Современные программы, использующие метод конечных элементов для различных расчётов [3], включают в себя модули рационального проектирования. Они позволяют оптимизировать расход материала при сохранении прочностных свойств конструкции. Это значит, что в заданной области проектирования можно существенно облегчить деталь путём удаления излишек материала. Такой расчёт называется топологической оптимизацией.

Необходимо разработать конструкцию махового колеса. Габариты детали не должны превышать установленные техническим заданием (рис. 1). Момент инерции маховика должен равняться  $J_m = 7150 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Максимальная частота вращения составляет 1000 оборотов в минуту или 105 радиан в секунду. Материал – литая углеродистая сталь.

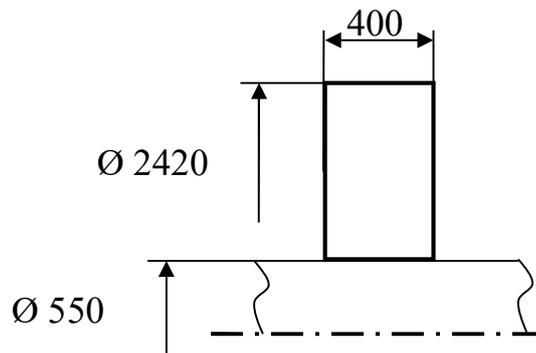


Рис. 1. Габаритный эскиз маховика

Согласно заданным ограничениям, имеем область проектирования, ограниченную габаритами. Требуем минимума целевой функции – массы. Технологические и производственные ограничения: наличие ступицы, момент инерции равный  $7150 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Так же дополнительно требуем, чтобы максимальное эквивалентное напряжение не превышало допустимого значения, то есть предела текучести с учётом коэффициента запаса прочности. Для определённости возьму коэффициент запаса равный 1.3.

Краткая схема этапов решения задачи представлена на рисунке 2. Вес конструкции составил  $7623 \text{ кг}$ .

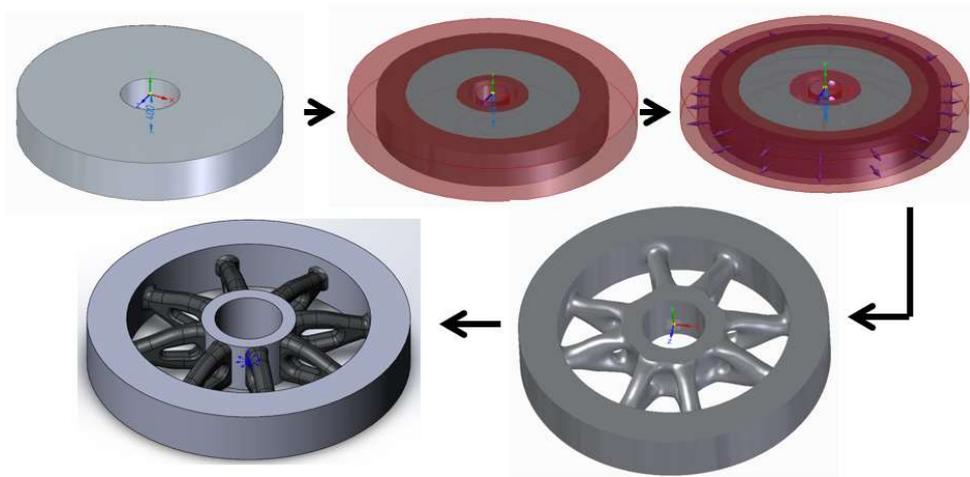


Рис. 2. Последовательность этапов моделирования и решения задачи

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биргер И.А. и др. Б64 Расчет на прочность деталей машин: Справочник/ И.А. Бригер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.: ил.
2. Демьянушко И.В., Биргер И.А. Д30 Расчёт на прочность вращающихся дисков. – М.: Машиностроение, 1978. – 247с., ил. – (Б-ка расчетчика).
3. Siemens Documentation: Solid Edge 2020 - Siemens PLM guide, 2020.

## DESIGNING AN OPTIMAL CONSTRUCTION OF FLYWHEEL

*Mosienko Dmitry Sergeevich, graduate student; Pel' Alexandr Nicolaevich,  
PhD. Techn. sciences'*

Novosibirsk state technical University, 20, Karl Marx Ave., Novosibirsk,  
630073, Russia, tel. +7(383)346-31-21

*Mosienko D. S.*, email [mosienko.2016@stud.nstu.ru](mailto:mosienko.2016@stud.nstu.ru)

*Pel' A. N.*, e-mail [pel@corp.nstu.ru](mailto:pel@corp.nstu.ru)

### Abstract

The main characteristic of a flywheel is the moment of inertia. The problem of rational distribution of material emerges during the design of its structure. It is necessary to create an optimal design to reduce the weight of the part. In this case, the technical and operational requirements must be met. This paper presents a calculation of topological design optimization using a flywheel by the finite element method. On its basis, the construction of the flywheel is designed. The calculation was performed using the Siemens solid edge 2020 software package.

### Keywords

Moment of inertia related to the shaft rotation axis; finite element method; topological optimization; rotation frequency; target function.

УДК 620.174.21

## РАЗРУШЕНИЕ ХРУПКИХ ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ВБЛИЗИ ОБЛАСТИ КОНТАКТА СО СТАЛЬНЫМИ ШАРАМИ

*Пилипенко Даниил Игоревич<sup>1</sup>, магистрант; Леган Михаил  
Антонович<sup>1,2</sup>, д.т.н., доцент; Федорова Наталья Виталиевна<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет, 630073,  
Россия,

г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (383)346-31-21

<sup>2</sup> Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,  
630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15

*Пилипенко Д. И.*, e-mail [hatoryhanzo734@gmail.com](mailto:hatoryhanzo734@gmail.com)

*Леган М. А.*, email [legan@ngs.ru](mailto:legan@ngs.ru)

*Федорова Н. В.*, e-mail [veter-nata@mail.ru](mailto:veter-nata@mail.ru)

*Адрес для корреспонденции: Пилипенко Даниил Игоревич,  
Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия,  
г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (913)986-12-47*

## Аннотация

В процессе создания новых материалов перед материаловедами встает вопрос о быстром и качественном определении прочностных характеристик. Для этого можно применить испытание на разрушение круглой свободно опертой пластины при вдавливании в её центр стального шара. В исследовании [1] был использован данный метод.

В работе будут представлены результаты численного и аналитического решения данной контактной задачи и их сравнения. В качестве численного метода будет использован метод конечных элементов в пакете ANSYS 19, в качестве аналитического воспользуемся решениями Войновского-Кригера об изгибе круглой пластины [2] и Хубера для контактной задачи Герца [3].

## Ключевые слова

Стекло; кольцеобразные трещины; задача Герца; эксперимент

## Введение

В процессе эксперимента изгибные растягивающие напряжения на нижней поверхности пластины достигают предельного напряжения материала на разрыв, из-за чего полученное напряжение в зарубежной литературе получило название поперечная прочность на разрыв.

Однако оценки растягивающих напряжений вблизи области контакта с шариком оказались выше значений растягивающих напряжений на нижней поверхности пластины и, следовательно, можно ожидать начало разрушения с образования кольцеобразной трещины в окрестности области контакта.

Изучение этого эффекта стало нашей целью в данной работе.

## 1. Методика экспериментального исследования

Для того что бы экспериментально определить начало образование кольцевой трещины желательно чтобы материал был прозрачным, поэтому материалом образцов было выбрано стекло.

## 2. Результаты и обсуждения

Расчетная схема численного эксперимента представлена на рисунке 1.

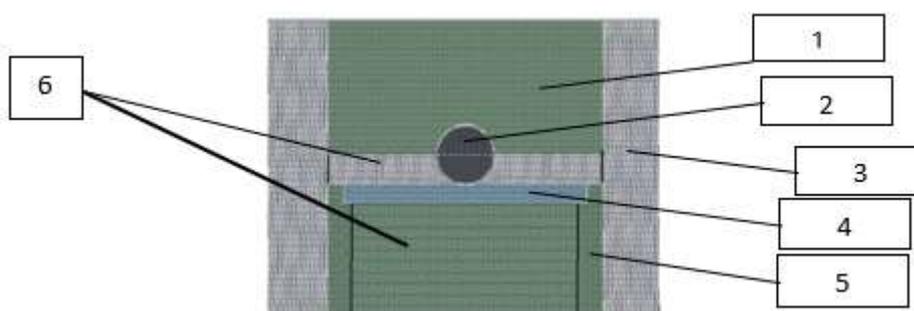


Рис. 1. Расчетная схема для эксперимента в разрезе. 1 – Цилиндр с выемкой для шара, 2 – стальной шар, 3 – выравнивающий цилиндр, 4 – стеклянная пластина, 5 – цилиндр с

отверстием и кромкой для пластины,  $b$  – пустое пространство, за которым виден выравнивающий цилиндр и цилиндр с кромкой

Размеры и характеристики материалов: шарик диаметром 6 мм из стали ШХ15, испытуемый образец – круглая стеклянная пластина диаметром 20 мм и толщиной 3 мм.

Условия контакта: зазор  $g$  между телами  $g \geq 0$ , сжимающие контактные силы, действующие по нормали к поверхностям,  $R_n \leq 0$ , касательные силы  $R_\tau$  отсутствуют.

Ограничено вертикальное перемещение пластины по внутреннему контуру опирания и горизонтальное перемещение на оси симметрии пластины.

Так как экспериментов проведено не было, то, следовательно, не известно значение силы, при котором происходит разрушение образца. На основании экспериментальных данных, полученных ранее, примем, что предел прочности стекла на растяжение  $\sigma_b$  равен 49 МПа. Зная это значение, с помощью формулы Войновского – Кригера найдем разрушающую силу.

$$P = \frac{\sigma_b h^2}{(1+\nu)(0,485 \ln \frac{b}{h} + 0,52) + 0,48} \quad (1)$$

Здесь  $b$  – внешний радиус пластины,  $h$  – толщина пластины,  $\nu$  – коэффициент Пуассона, который для стекла равен 0,2. Найденное значение силы  $P = 328$  Н будем использовать в расчетах.

После расчета получаем распределение напряжений в образце. На этом этапе проведем исследования сходимости сетки. Уменьшим ее в 1,5 раза и сравним полученные результаты. При уменьшении размеров конечного элемента полученные максимальные напряжения значительно увеличились. Поэтому стоит продолжить вычисление с более мелкой сеткой. В итоге, решая задачу численным методом, получили распределение максимальных напряжений (рис. 2). При этом вызванное изгибом напряжение в центре контакта на нижней поверхности пластины достигло максимального значения  $\max \sigma_{\text{Изгч}} = 49,9$  МПа, что на порядок меньше величины максимального напряжения в окрестности области контакта  $\max \sigma_{\text{Кч}} = 477,8$  МПа. Кроме того, вычислен радиус области контакта

$a_{\text{ч}} = 0,24$  м и определен давление в центре области контакта  $p_{0\text{ч}} = 2759$  МПа.

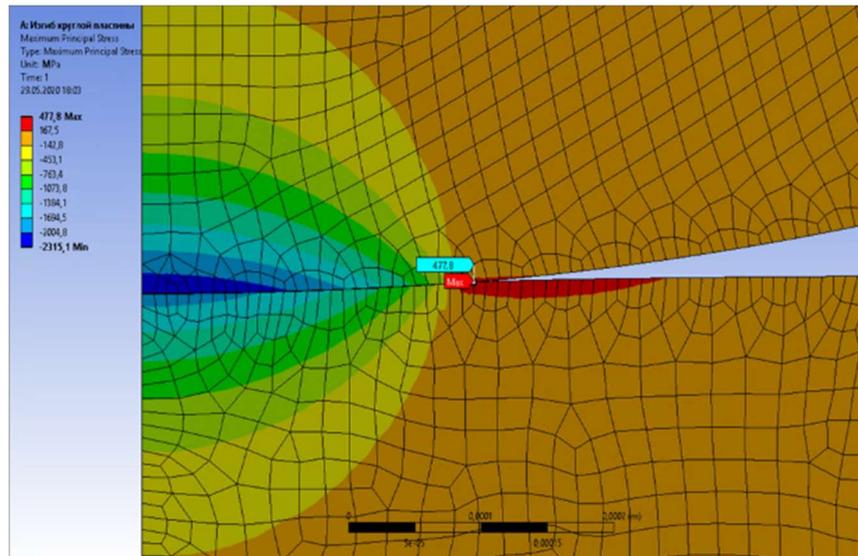


Рис. 2. Распределение максимальных напряжений в области контакта

Далее, для проверки, сравним решение конечно – элементным методом с распределением радиального растягивающего напряжения в окрестности области контакта по формуле (2), полученной Хубером при решении задачи Герца.

$$\sigma_r = \frac{3}{2} p_m \left[ \frac{1-2\nu}{3} \frac{a^2}{r^2} \left( 1 - \frac{z^3}{\sqrt{u^3}} \right) + \frac{a^2 z^3}{(u^2 + a^2 z^2) \sqrt{u}} + z \frac{(1-\nu) \sqrt{u}}{a^2 + u} + z \frac{1+\nu}{a} \operatorname{arctg} \left( \frac{a}{\sqrt{u}} \right) - 2 \frac{z}{\sqrt{u}} \right] \quad (2)$$

Здесь  $a = \sqrt[3]{\frac{3PR}{4E^*}}$  – радиус области контакта,  $R$  – радиус шара,  $E^* = \left( \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_{st}^2}{E_{st}} \right)^{-1}$  – эффективный модуль упругости,  $E = 70$  ГПа – модуль Юнга стекла,  $\nu = 0,2$  – коэффициент Пуассона стекла,  $E_{st} = 211$  ГПа – модуль Юнга стали,  $\nu_{st} = 0,2$  – коэффициент Пуассона стали,  $p_m = P/(\pi a^2)$  – среднее давление в области контакта,  $u = \frac{1}{2} [r^2 + z^2 - a^2 + \sqrt{(r^2 + z^2 - a^2)^2 + 4a^2 z^2}]$ ,  $r$  – радиус от оси  $z$ , проходящей через начальную точку контакта вглубь стекла по нормали к поверхности стекла. При  $z = 0, r = a$  находим максимальное контактное напряжение  $\sigma_r = 555.6$  МПа.

Вычислим радиус  $a$  области контакта и максимальное давление  $p_0$  в центре области контакта

$$a = \sqrt[3]{\frac{3PR}{4E^*}} = 0.23 \text{ м}, \quad p_0 = \frac{3}{2} p_m = 2784 \text{ МПа}$$

Полученные значения сравним с результатами численного решения

$$\delta_{\text{рад}} = \left| \frac{a_{\text{ч}} - a}{a} \right| \cdot 100\% = 2.1 \%, \quad \delta_{\text{давл}} = \left| \frac{p_{0\text{ч}} - p_0}{p_0} \right| \cdot 100\% = 0.9 \%$$

Для наглядности вынесем все полученные результаты в таблицу 1.

## Полученные результаты

	Численное решение	Аналитическое решение
Контактные напряжения, МПа	477,8	555,6
Изгибные напряжения на нижней стороне пластины, МПа	49,9	49
Давление в центре области контакта, МПа	2759	2784
Радиус области контакта, мм	0,24	0,23

**Выводы**

В результате сравнения можно сделать вывод о том, что соответствие между численным и аналитическими решениями получается достаточно хорошим, за исключением максимальных контактных напряжений. Значение, полученное из аналитического решения, оказалось на 14% больше численного значения. Это объясняется тем, что решение Хубера не учитывает изгиб, а изгибные сжимающие напряжения на верхней поверхности пластины уменьшают растягивающие напряжения в окрестности области контакта. Вопрос о начале образования кольцеобразных трещин и определении нагрузки, при которой они образуются, будет исследован в дальнейшем.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Structural and mechanical characterization of porous iron aluminide FeAl obtained by pressureless Spark Plasma Sintering / D. V. Dudina, M. A. Legan, N. V. Fedorova, A. N. Novoselov, A. G. Anisimov, M. A. Esikov // Materials science & Engineering. A: Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing. - 2017. - Vol. 695. - P. 309-314.
2. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластины и оболочки. – М.: Наука, 1966. – 636 с.
3. Huber M. T. Zur Theorie der Berührung fester elastischer Körper // Ann. Physik. 1904. Bd 14. - S. 153–163.

**DESTRUCTION OF BRITTLE TRANSPARENT MATERIALS NEAR THE AREA OF CONTACT WITH STEEL BALLS**

Pilipenko Daniil Igorevich <sup>1</sup>, Master's Degree student; Legan Mikhail Antonovich <sup>1,2</sup>, D.Sc., associate Professor; Fedorova Natalia Vitalievna <sup>1,2</sup>,

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russia, tel. (383)346-31-21

<sup>2</sup> Lavrentiev Institute of Hydrodynamics SB RAS, 15 Akademika Lavrentieva Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

*Pilipenko D. I.*, e-mail [hatoryhanzo734@gmail.com](mailto:hatoryhanzo734@gmail.com)

*Legan M. A.*, email [legan@ngs.ru](mailto:legan@ngs.ru)

*Fedorova N. V.*, e-mail [veter-nata@mail.ru](mailto:veter-nata@mail.ru)

*Correspondence address: Pilipenko Daniil Igorevich*, Novosibirsk state technical University, 20 Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russia, tel. (913)986-12-47

### **Abstract**

In the process of creating new materials, material scientists face the question of fast and high-quality determination of strength characteristics. One of these methods is the destruction of a round freely supported plate with a steel ball, [1] and this method was used.

The paper presents the results of numerical and analytical solutions of this contact problem and their comparison. Finite element method in ANSYS 19, it used as the numerical method as we use analytical solutions Voynovskiy-Krieger bending of circular plates [2], and Huber for the contact Hertz problem [3].

During the experiment, the tensile stresses on the lower surface reach the ultimate tensile strength of the material, which is why the plate is destroyed by bending, and the resulting stress in foreign literature is called transverse tensile strength.

However, the tensile stresses near the contact area with the ball must be higher than the tensile stresses on the lower surface and the fracture must begin with an annular crack.

The study of this effect has become our goal in this work.

**Keyword:** glass; ring-shaped cracks; Hertz problem; experiment

## НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ, ОСЛАБЛЕННЫХ ОТВЕРСТИЕМ

*Романенко Евгений Игоревич, магистрант;*

*Пель Александр Николаевич, доцент.*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия,  
г.Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (383)346-31-21

**Романенко Е. И.**, email yevgeny.romanenko@yandex.ru

**Пель А. Н.**, email pel@corp.nstu.ru

### **Аннотация**

В данной работе проведены натурные испытания образцов без отверстия с целью получения диаграммы растяжения и образцов с отверстием с целью получения максимальной нагрузки, для сравнения с результатами численного решения.

**Ключевые слова:** экспериментальное исследование; разрушающие нагрузки; пластина с отверстием; разрушающие напряжения

### **Введение**

Поскольку о прочности авиационных конструкций принято судить по результатам испытаний на разрушающие нагрузки, то необходим метод, который позволял бы их вычислять. Этот метод должен учитывать работу конструкции за пределом упругости.

Существующие аналитические методы, такие как метод редуцированных коэффициентов [1], не позволяющие в полной мере учесть особенности конструкций, например, влияние концентрации напряжений вблизи отверстий.

Между тем, расчет разрушающей нагрузки клепаных соединений вида панели со стрингером является актуальной задачей. Задача существенно усложняется, если детали изготавливаются из материалов с различными механическими характеристиками. Например, стрингер- алюминевый сплав В95, а обшивка- Д16.

Цель работы- сравнении результатов испытания образцов с отверстием из материала В95 с расчетом в конечно – элементном пакете [3].

## Эксперимент

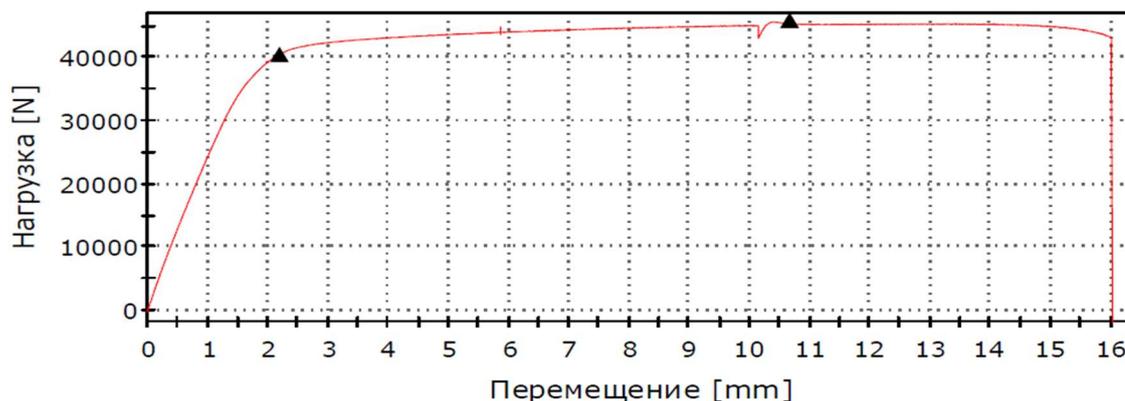


Рис. 1. Диаграмма растяжения ( $N(U)$ ) для материала B95

Для расчета пластины с отверстием в конечно - элементном пакете с учетом физической нелинейности необходимо обладать диаграммой деформаций. Мы получили ее после проведения экспериментов на образцах без отверстий из такого же материала.

Также были испытаны образцы с отверстием и получены разрушающие нагрузки (табл.1).

Таблица 1

### Результаты испытаний

	B95	B95
d, мм	5	10
F, Н	76406	65367

## Расчет конечно – элементной модели

Сложность расчета в конечно – элементном пакете ANSYS заключалась, в задании нелинейности материала. Для этого необходимо задать сначала упругую зону затем пластическую. Для упругой необходим модуль упругости и коэффициент Пуассона. Пластическую зону задавал с помощью таблицы начиная с предела пропорциональности.

Property	Value	Unit
Density	7850	kg m <sup>-3</sup>
Young's Modulus	20000	MPa
Poisson's Ratio	0.33	
Bulk Modulus	6.9627E+10	Pa
Shear Modulus	2.6338E+10	Pa
Tensile Yield Strength	520	MPa

Рис. 2. Упругая зона материала B95

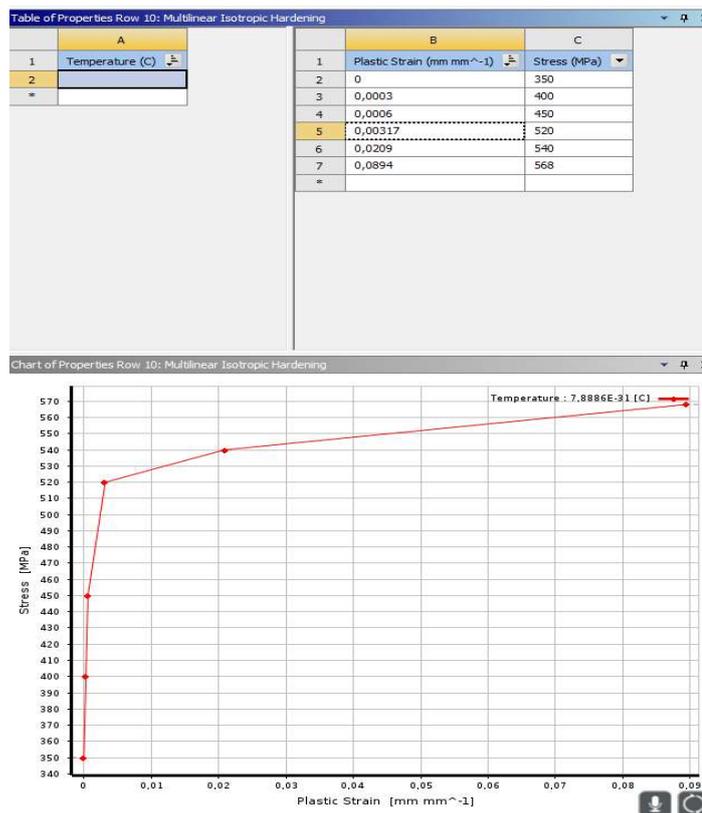


Рис. 3. Пластическая зона материала В95

Затем решалась симметричная задача в физически нелинейной постановке.

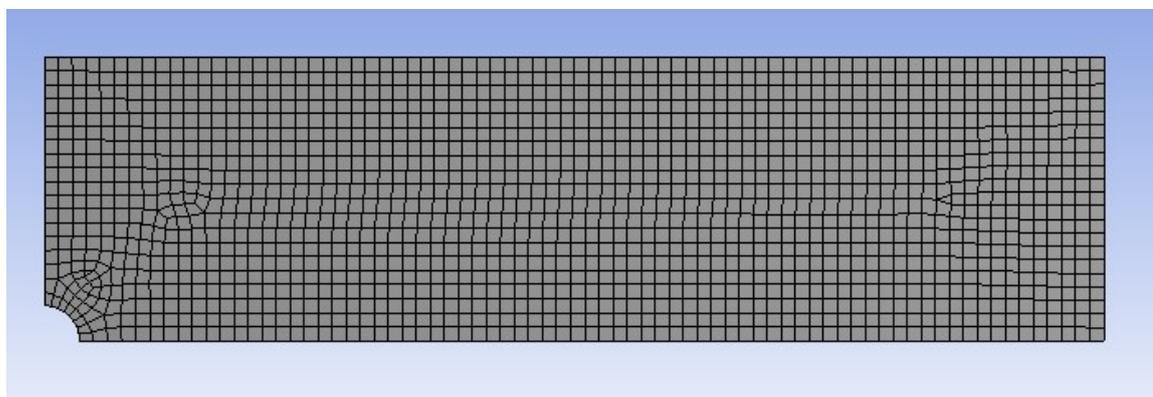


Рис. 4. Конечно-элементная модель

Таблица 2

Результаты численного решения

	B95	B95
d, мм	5	10
F, Н	77360	66620

**Полученные результаты**

Сравнение полученных результатов эксперимента с расчетом:

Сравнение нагрузок

Материал	В95 ( $d = 5$ (мм))	В95 ( $d = 10$ (мм))
Эксперимент, Н	76406	65367
Численное решение, Н	77360	66620
Разница, %	1,2	1,8

**Вывод**

Рассматривая данные, приведенные в таб. 3, видим, что результаты расчета и натурального эксперимента получились достаточно близкими. Это означает что, используя только диаграмму растяжения материала, можно опираться на результаты численного решения более сложных образцов, не проводя дорогостоящих экспериментов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Стригунов В.М. Расчет самолета на прочность: Учебник для авиационных вузов. – М.: Машиностроение, 1984. – 376 с., ил.
2. Тимошенко С.П., Войновский – Кригер С. Пластинки и оболочки. – М., Изд-во «Наука», 1966. – 636 с., ил.
3. Бруйка В.А. Инженерный анализ в Ansys Workbench Часть I. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.: ил.

**FULL-SCALE TESTING OF SAMPLES WEAKENED BY A HOLE**

**Romanenko Yevgeny Igorevich, Graduate students;**

**Pel Alexander Nikolaevich, associate Professor.**

Novosibirsk state technical University, 20 Karl Marx Ave., Novosibirsk,  
630073, Russia, tel. +7(383)346-31-21

**Romanenko E. I.**, email [yevgeny.romanenko@yandex.ru](mailto:yevgeny.romanenko@yandex.ru)

**Pel A. N.**, email [pel@corp.nstu.ru](mailto:pel@corp.nstu.ru)

**Abstract**

In this paper, full-scale tests of samples without a hole were performed in order to obtain a tensile diagram and samples with a hole in order to obtain the maximum load, for comparison with the results of the numerical solution.

**Keywords:** experimental research; breaking loads; plate with a hole; breaking stresses

## ФОРМИРОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ $\text{SiC}_v/\text{SiC}_m$ ИСКРОВЫМ ПЛАЗМЕННЫМ СПЕКАНИЕМ ПРЕКЕРАМИЧЕСКИХ БУМАГ

*Седанова Елизавета Павловна, аспирант; Кашкаров Егор Борисович, к.ф.-м.н.,  
Лидер Андрей Маркович, д.т.н., Сыртанов Максим Сергеевич, к.т.н.*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

*Седанова Е.П., email [eps4@tpu.ru](mailto:eps4@tpu.ru)*

*Адрес для корреспонденции: Седанова Елизавета Павловна, Национальный  
исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия,  
г. Томск, пр. Ленина, 43, тел. (913)825-62-24*

### Аннотация

Исследование направлено на синтез керамических композитов  $\text{SiC}_v/\text{SiC}_m$ , в которых в качестве основного материала выступит прекерамическая бумага с карбидокремниевым порошковым наполнителем. Для улучшения механических свойств материалов композит из прекерамической бумаги был послойно армирован карбидокремниевыми непрерывными волокнами. Исследовано влияние параметров спекания на механические свойства, фазовый состав и структуру полученных материалов. Показано, что прекерамические бумаги с  $\text{SiC}$  наполнителем, послойно армированные непрерывными волокнами  $\text{SiC}$ , могут быть использованы в качестве исходного сырья для быстрого синтеза прочных керамических композитов  $\text{SiC}_v/\text{SiC}$ .

**Ключевые слова:** карбид кремния,  $\text{SiC}$  волокно, искровое плазменное спекание, прекерамическая бумага.

### Введение

Перспективность применения материалов на основе карбида кремния в качестве материалов газовых турбин, элементов двигателей внутреннего сгорания, режущих инструментов, а также конструкционных материалов в энергетике обусловлена физико-химическими свойствами данного соединения, среди которых можно выделить жаростойкость, конструкционную прочность при относительно небольшой плотности материала, устойчивость к коррозии [1]. Разработка композитов с керамической матрицей, армированной карбидокремниевыми волокнами ( $\text{SiC}_v/\text{SiC}$ ), на сегодняшний день является перспективным подходом для создания материалов для аэрокосмической и ядерной отраслей [2, 3]. Существенным недостатком  $\text{SiC}$  керамики является ее хрупкость при механической обработке, что затрудняет использование в качестве материала для изделий сложной формы [4].

В работе рассматривается возможность получения керамических материалов на основе  $\text{SiC}_b/\text{SiC}$ , путем высокотемпературного спекания прекерамической бумаги [5]. Предполагается, что использование прекерамических бумаг при высокотемпературном спекании позволит получать керамические изделия сложной формы путем послойной укладки и механической обработки бумаги перед спеканием. Наиболее эффективным из методов спекания керамики на основе порошков карбида кремния является метод искрового плазменного спекания (ИПС), который позволяет получать плотные керамические материалы за короткий по времени цикл спекания без предварительной обработки исходного сырья [6]. Физико-химические свойства получаемых материалов возможно регулировать до требуемых значений при изменении параметров спекания бумаг.

Таким образом, цель исследования заключалась в анализе изменения состава и механических свойств композитов  $\text{SiC}_b/\text{SiC}$ , в зависимости от параметров ИПС.

## 2. Материалы и методы

Изготовление прекерамической бумаги подробно описывается в работе [5]. Процесс подготовки  $\text{SiC}$  композита с армирующими волокнами представлен на рисунке 1.

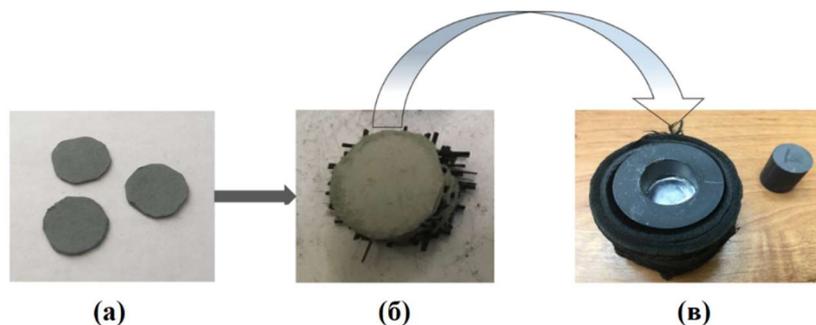


Рис. 1. Подготовка композита для искрового плазменного спекания

Синтез армированных композитов осуществлялся с использованием установки SPS 10–4 (Advanced Technology, США). Спекание композитов проводилось при следующих параметрах: скорость нагрева –  $180\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ , температура синтеза –  $2100\text{ }^\circ\text{C}$ , время синтеза – 3-10 минут. Давление при синтезе композитов варьировалось от 20 МПа до 60 МПа. Для оценки влияния армирующих волокон была подготовлена серия образцов без волокон, синтезированная при тех же параметрах.

Анализ прочности на изгиб исследуемых образцов проводился на испытательной машине Gotech al7000m.

Синтезированные образцы были исследованы методом гидростатического взвешивания с целью определения плотности материала образцов. Анализ структуры и фазового состава осуществлялся методом рентгеновской дифракции на дифрактометре Shimadzu XRD 7000S ( $\text{CuK}\alpha$  излучение).

## 3. Результаты и обсуждение

Зависимость плотности композитов от давления при синтезе представлена на рисунке 2. Наибольшее значение плотности композита  $\text{SiC}_\text{в}/\text{SiC}$ , полученного при 60 МПа и 10 минутах, составляло  $2,61 \text{ г/см}^3$ .

На рисунке 3 представлены дифрактограммы прекерамической бумаги до спекания и синтезированных композитов.

На рисунке 4 показаны кривые нагружения-разгрузки армированного композита и композита без волокна.

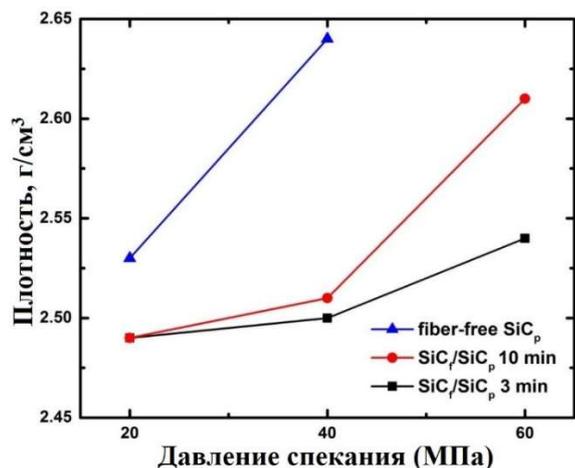


Рис. 2. Зависимость плотности композитов от давления при синтезе

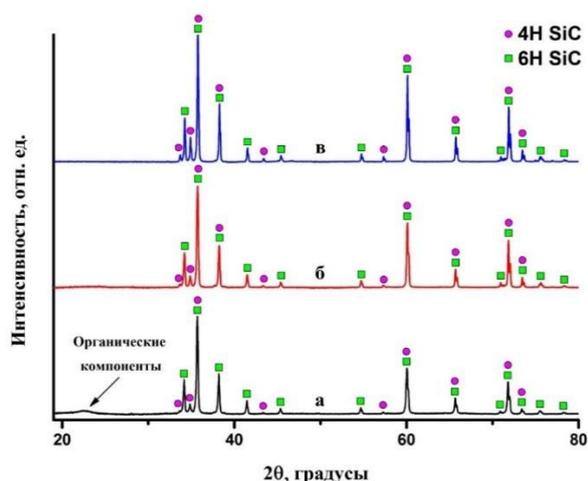


Рис.3. Дифрактограммы прекерамической бумаги (а), композита без волокна (б) и композита с волокном (в)

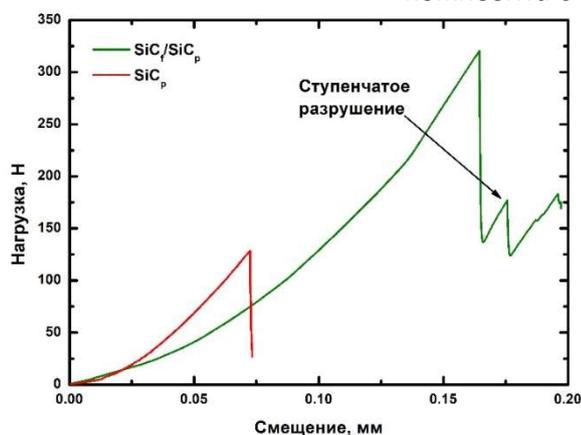


Рис. 4. Кривые нагружения-разгрузки армированного композита и композита без волокна синтезированные при 40 МПа и длительности спекания 10 минут

#### 4. Выводы

Анализ плотности композитов показывает, что добавление волокон приводит к снижению плотности. Для всех серий образцов, плотность композитов, выдержанных при максимальной температуре в течение 10 минут выше, чем в течение 3 минут. Также необходимо отметить, что плотность композитов увеличивается с ростом давления спекания. Наибольшее значение плотности композита  $\text{SiC}_\text{в}/\text{SiC}_\text{м}$ , полученного при 60 МПа и 10 минутах, составляло  $2,61 \text{ г/см}^3$ .

Установлено, что фазовый состав синтезированных композитов  $\text{SiC}_B/\text{SiC}$  соответствует составу исходных прекерамических бумаг с карбидокремниевым наполнителем. Кристаллическая структура композита представлена  $\alpha$ -фазами  $6\text{H-SiC}$  (78%) и  $4\text{H-SiC}$  (22%). Органические компоненты прекерамической бумаги удаляются в процессе спекания.

Прочность композитов  $\text{SiC}_B/\text{SiC}_M$  на изгиб увеличивается с увеличением давления спекания. Максимальное значение предела прочности 430 МПа достигнуто для композита  $\text{SiC}_B/\text{SiC}_M$  при давлении 60 МПа в течение 3 мин.

*Работа выполнена в рамках Программы повышения конкурентоспособности НИ ТПУ среди ведущих мировых научно-образовательных центров.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nozawa T., Katoh Y., Kohyama A. Evaluation of tensile properties of  $\text{SiC}/\text{SiC}$  composites with miniaturized specimens // *Materials transactions*. – 2005. – V. 46. – №. 3. – P. 543-551.
2. Yang J., Dong S., Xu C. Mechanical response and microstructure of 2D carbon fiber reinforced ceramic matrix composites with  $\text{SiC}$  and  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  fillers // *Ceramics International*. – 2016. – V. 42. – №. 2. – P. 3019-3027.
3. Deck C. P. et al. Characterization of  $\text{SiC-SiC}$  composites for accident tolerant fuel cladding // *Journal of Nuclear Materials*. – 2015. – V. 466. – P. 667-681.
4. Lee Y., Mckrell T. J., Kazimi M. S. Thermal shock fracture of silicon carbide and its application to LWR fuel cladding performance during reflood // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2013. – V. 45. – №. 6. – P. 811-820.
5. Travitzky N. et al. Preceramic Paper-Derived Ceramics // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2008. – V. 91. – №. 11. – P. 3477-3492.
6. Noviyanto A., Han Y. H., Yoon D. H. Characteristics of  $\text{SiCf}/\text{SiC}$  hybrid composites fabricated by hot pressing and spark plasma sintering // *Advances in Applied Ceramics*. – 2011. – V. 110. – №. 7. – P. 375-381.

## THE $\text{SiC}_f/\text{SiC}$ CERAMIC COMPOSITES FORMATION BY SPARK PLASMA SINTERING OF PRECERAMIC PAPERS

*Sedanova Elizaveta, postgraduate student; Kashkarov Egor, PhD; Lider Andrey, D.Sc; Syrtanov Maxim, PhD*

National Research Tomsk Polytechnic University, 634050, Russia, Tomsk,  
Lenin Ave., 30

*Sedanova E.*, email [eps4@tpu.ru](mailto:eps4@tpu.ru)

**Abstract** The project aims to develop composite ceramic materials  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$ , in which preceramic paper with  $\text{SiC}$  powder filler using as a feedstock. The formation of composites from preceramic papers is a new direction in the synthesis of materials and provides the opportunity of creating complex shape structures with desired properties. Reinforcing silicon carbide ceramics by  $\text{SiC}$  fibers will improve the

mechanical properties of composite materials. The materials was obtained by the method of spark plasma sintering. The influence of the sintering parameters on the mechanical properties, phase composition of the materials was investigated. It is shown that preceramic papers with SiC filler, layer-by-layer reinforced with continuous SiC fibers, can be used as a feedstock for the fast synthesis of strong SiC<sub>f</sub>/SiC ceramic composites.

**Keywords:** silicon carbide, spark plasma sintering, preceramic paper, SiC fibers

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦА, ИЗГОТОВЛЕННОГО НА 3D ПРИНТЕРЕ

*Серикбаев Михаил Сергеевич, магистрант; Белоусов Анатолий  
Иванович*

Новосибирский государственный технический университет, 630073,  
Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (383)346-31-21

*Серикбаев М.С.*, email [mihail.serikbaev@mail.ru](mailto:mihail.serikbaev@mail.ru)

*Белоусов А.И.*, email [belousovland@mail.ru](mailto:belousovland@mail.ru)

Адрес для корреспонденции: **Серикбаев Михаил Сергеевич**,  
Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г.  
Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (383)346-31-21

### **Аннотация**

Для выполнения данной работы с помощью 3D-печати был изготовлен образец для динамических испытаний, а также была взята нить, с помощью которой производилась печать. В ходе выполнения работы были проведены эксперименты на растяжение нити. Для обработки полученных данных использовали аппроксимацию методом наименьших квадратов. Усреднив результаты испытаний было получено значение модуля упругости. Аналитически была решена задача колебания стержня. Так же была смоделирована задача колебания образца как балки и как пластины. Также было исследовано влияние датчика на значения частот эксперимента на вибростенде. По результатам исследования были построены графики зависимости собственных частот под влиянием датчика.

**Ключевые слова:** модуль упругости; аппроксимация; метод конечного элемента; частота колебания; формы колебаний

3D принтер создаёт объект путем послойного наращивания (наплавления) и синтеза объекта с помощью компьютерных 3D технологий. 3D-принтер легко справляется с изготовлением моделей любой формы. Однако трудно утверждать, что прочностные характеристики материала деталей, получаемых с использованием 3D-печати, соответствуют прочностным свойствам материала нитей, которые при этом используются. Нанесение слоёв при печати последовательным наплавлением ведёт к образованию многоуровневой физической структуры. Внутри этой структуры могут возникать несплошности, за счет различий укладываемых слоев, различные дефекты. [3]. Поэтому целью данной работы является сравнение характеристик нити, используемой для печати и готового образца, напечатанного из такой нити.

Чтобы провести данный анализ, для напечатанного образца будем использовать частотный подход, проведем эксперимент на вибростенде. Для исходной нити будем использовать эксперимент на растяжение.

Для начала проведем испытания нити на растяжение. Основной целью испытания является построение диаграммы растяжения, т.е. зависимости между силой, действующей на образец, и его удлинением [3]. Образец подвергается действию плавно нарастающей нагрузки (статическое нагружение).

В результате эксперимента получаем данные времени, напряжений, силы и деформаций. Выполнив обработку данных с помощью аппроксимирования с получаем диаграмму растяжения. По формуле (1) находим значение модуля упругости.

$$E = \frac{\sigma_{n+1} - \sigma_n}{\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_n} \quad (1)$$

Строим график зависимости модуля упругости от действующей нагрузки (Рис.1).

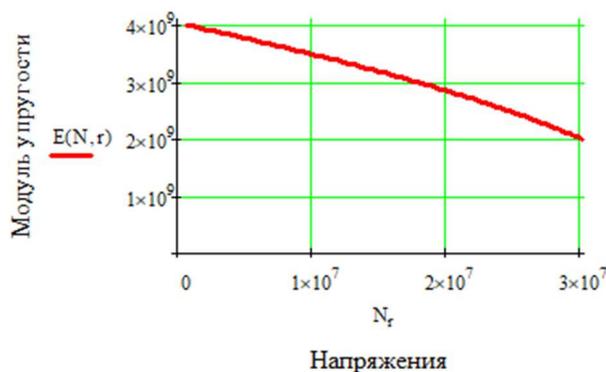


Рис. 1. График зависимости модуля упругости от напряжения

Обработав данные каждого эксперимента, усредняя их, получим значение для модуля упругости в начальный момент нагружения:  $E=4370,34$  МПа.

Далее решим задачу колебания образца. Для аналитического решения воспользуемся теорией стержней. Имеем консольно закрепленный стержень длиной 12,5 см. Решая такую задачу, получаем формулу для определения значения собственной частоты, из которой можем выразить выражение для динамического модуля упругости, формула (2).

$$E = \frac{12 \cdot p_1^2 \cdot l^4 \cdot \rho \cdot (2\pi)^2}{(kl)_1^4 \cdot h^2} \quad (2)$$

Так же, зная модуль упругости материала, полученный из испытаний на растяжение, можем посчитать теоретическую частоту колебания [1, с.279]:

$$p_1 = \frac{(1.875)_1^2}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{EI}{l^3 \cdot \rho \cdot V}} = 58.12 \text{ Гц.}$$

Далее решим задачу методом конечных элементов. Рассмотрим пример решения задачи с помощью пакета COSMOS/M. Для начала рассчитаем с использованием типа конечного элемента, соответствующего плоскому балочному 2-х узловому КЭ BEAM2D.

Создаём геометрию конструкции, выбираем тип КЭ, задаем характеристики материала и геометрию поперечного сечения. После разбиваем на КЭ и задаем граничные условия. Решаем задачу.

При разбиении получили 13 КЭ, в таком случае расхождение результата с теорией стержней около 0,3%.

Решим задачу с меньшим размером КЭ. При разбиении получили 25 КЭ, при таком решении расхождение в результатах около 0,03%.

Аналогично рассчитаем задачу ещё раз, но в качестве типа КЭ будем использовать треугольный КЭ SHELL3, используемый в задачах изгиба пластин.

При разбиении на 10 КЭ получаем следующее значение:

$$p_1 = \frac{364.2091}{2\pi} = 57.96 \text{ Гц.}$$

А при разбиении на 52 КЭ получаем:

$$p_1 = \frac{367.8614}{2\pi} = 58.55 \text{ Гц.}$$

Сравнивать эти значения будем с частотой, полученной с помощью теории пластин.

Посчитаем частоту колебания пластины. Для решения такой задачи в первом приближении в качестве минимизирующей формы следующую функцию, формула (3).

$$w(x, y) = X_1(x)Y_1(y) \quad (3)$$

где  $X_1(x)$  удовлетворяет краевым условиям стержня, заделанного на конце ( $x=0$ ) и свободного на другом ( $x=0.125\text{м}$ ), а функция  $Y_1(y)$  удовлетворяет краевым условиям стержня, свободного на концах. Первая частота колебаний такого стержня равно нулю, а первая форма – постоянное число, формула (4).

$$Y_1(y) = const \quad (4)$$

Это число мы примем равным единице. Поэтому на всех краях пластинки справедливы следующие выражения, формула (5)

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = 0 \quad (5)$$

Тогда выражение для потенциальной энергии, формула (6).

$$P_{max} = \frac{D}{2} \int_0^a \int_0^b \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx dy = \frac{D}{2} \int_0^b Y_1^2 dy \int_0^a X_1''^2 dx = 22.933 \frac{Db}{a^3} \quad (6)$$

Выражение для кинетической энергии, формула (7).

$$T_{max} = \frac{\gamma h p^2}{2g} \int_0^a \int_0^b X_1^2 Y_1^2 dx dy = 1.8556 \frac{\gamma h p^2 a b}{2g} \quad (7)$$

Квадрат частоты представляет собой отношение потенциальной энергии к кинетической, тогда:

$$p_1 = \frac{3.52}{a^2 2\pi} \sqrt{\frac{Dg}{\gamma h}} = 60.1 \text{ Гц.}$$

Сравним теоретическую частоту с частотами, полученные с помощью моделирования: при количестве КЭ равным 13 расхождения 3.5%; при количестве КЭ равным 52 расхождения 2.6%.

Исследуем, насколько датчик будет вносить изменения в значениях собственной частоты при проведении динамического эксперимента. Масса датчика 4гр, а масса балки 14гр.

Решать такую задачу будем в программном пакете MathCAD с помощью метода конечных элементов. Ведём учет массы датчика путём прибавления её к соответствующему элементу узла в матрице масс.

В результате можем построить график изменения собственных частот под влиянием датчика (Рис 2).

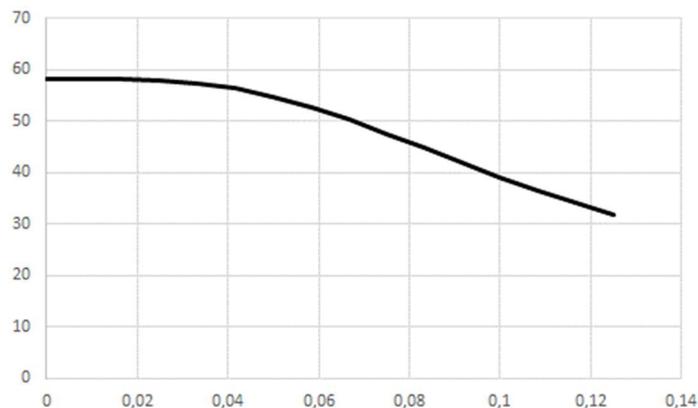


Рис. 2. Изменение первой собственной частоты под влиянием датчика

Для определения частоты первой формы собственных колебаний во время эксперимента необходимо расположить датчик на расстояние не большем чем 0.05 м. от заделки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабаков, И.М. Теория колебаний : учебное пособие / И.М. Бабаков. – 4-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2004. – 591, [1] с.: 130 ил., 15 табл.
2. Как устроен 3D-принтер. [Электронный ресурс] // - Режим доступа: <https://www.losprinters.ru/articles/kak-ustroen-3d-printer/>, свободный. – Загл. с экрана.
3. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: Учеб. для вузов. – 10-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 592 с.

# DEFINING THE FREQUENCY CHARACTERISTICS OF A 3D PRINTING SAMPLE

*Serikbaev Milhail Sergeevich, Master's Degree student; Belousov Anatoly Ivanovich*

Novosibirsk State Technical University 630073, Russia, Novosibirsk, K. Marx Ave., 20, +7(383)346-31-21

*Serikbaev M.S.*, email [mihail.serikbaev@mail.ru](mailto:mihail.serikbaev@mail.ru)

*Belousov A.I.*, email [belousovland@mail.ru](mailto:belousovland@mail.ru)

## Abstract

To perform this work, a sample for dynamic testing was made using 3D printing, and the thread used for printing was also taken. In the course of the work, experiments were carried out on stretching the thread. Least squares approximation was used to process the data obtained. Averaging the test results, the value of the elastic modulus was obtained. The problem of oscillations of a rod. The problem of sample oscillation as a beam and as a plate was so modeled. The influence of the sensor on the frequency values of the experiment on the vibration stand was also investigated. Based on the results of the study, graphs of the dependence of natural frequencies under the influence of the sensor were constructed.

**Keywords:** modulus of elasticity; approximation; finite element method; oscillation frequency; modeshapes

УДК 624.04

## ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ОСЕСИММЕТРИЧНОМ НАГРУЖЕНИИ

*Томшин Виктор Михайлович*<sup>1</sup>, магистрант; *Пель Александр Николаевич*<sup>1</sup>, к.т.н., доцент

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (383)346-31-21

*Томшин В. М.*, email [wiktom@mail.ru](mailto:wiktom@mail.ru)

*Пель А. Н.*, e-mail [pel@corp.nstu.ru](mailto:pel@corp.nstu.ru)

Адрес для корреспонденции: *Томшин Виктор Михайлович*, Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. +7(923)777-32-87

## Аннотация

В статье представлены результаты определения прогиба, деформации, напряжений для короткой цилиндрической оболочки при осесимметричном

нагрузении, вычислены максимальные значения этих параметров. Аналитическое решение задачи основано на решении дифференциального уравнения, в которое входят четыре произвольные постоянные. Соответственно, задача сводится к поиску этих постоянных. Аналитическое решение задачи было произведено в программе MathCAD. Для подтверждения полученных результатов данная задача была решена с использованием программного обеспечения для инженерного анализа и численного моделирования в ANSYS. Результаты, полученные этими двумя способами решений совпали в пределах допустимой погрешности.

**Ключевые слова:** напряжения, деформации, прогиб, аналитическое решение, функции Крылова, начальные параметры.

## Введение

Очень важным фактором при исследовании какой-либо конструкции является определение ее напряженно-деформированного состояния (НДС). Схема осесимметричной цилиндрической оболочки распространяется на многие инженерные конструкции такие как: котлы, баки, нефтепроводы, газопроводы, детали машин и другие. Осесимметричная изгибная деформация тонкостенных конструкций возникает в местах приложения внешних кольцевых нагрузок, а также в местах закрепления или сопряжения с другими конструктивными элементами.

## 2. Теория, материалы и методы

Короткая тонкостенная цилиндрическая оболочка нагружена равномерным наружным давлением, приложенным на конце участка поверхности длиной  $a$ . Второй конец трубы закреплен - имеет жесткую заделку рис.1.

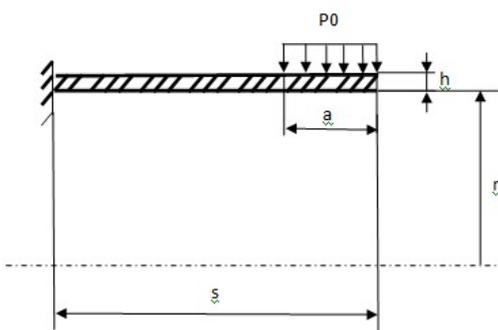


Рис. 1. Расчетная схема короткой тонкостенной цилиндрической оболочки

Оболочку принято рассматривать как короткую, если  $s < 2,5\sqrt{rh}$ .

Существует способ, при котором можно будет решать систему не из четырех уравнений, а всего из двух. Этот способ основан на использовании функций Крылова, их свойств, а также записи выражений через начальные параметры. Функции Крылова имеют следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_1(\beta x) = ch\beta x \cos \beta x; \\ V_2(\beta x) = \frac{1}{2}[ch\beta x \sin \beta x + sh\beta x \cos \beta x]; \\ V_3(\beta x) = \frac{1}{2}sh\beta x \sin \beta x; \\ V_4(\beta x) = \frac{1}{4}[ch\beta x \sin \beta x - sh\beta x \cos \beta x]; \end{array} \right. \quad (1)$$

С учетом всех этих преобразований, выражение для прогиба осесимметрично нагруженной короткой цилиндрической оболочки будет иметь следующий вид:

$$\omega = B_1 V_1(\beta x) + B_2 V_2(\beta x) + B_3 V_3(\beta x) + B_4 V_4(\beta x) + \bar{\omega} \quad (2)$$

Где  $B_1, B_2, B_3, B_4$  - константы, а  $\bar{\omega}$  - частное решение, которое определяется по формуле (3).

$$\bar{\omega} = \frac{1}{4\beta^4} \left( -\frac{\mu T_x}{Dr} + \frac{p_1}{D} \right) = \left( p_1 - \frac{\mu T_x}{r} \right) \frac{r^2}{Eh} \quad (3)$$

Функции Крылова  $V_1, V_2, V_3, V_4$  во многом используются благодаря своим свойствам. Каждую из этих функций можно выразить через другую функцию. Это свойство является полезным при дифференцировании выражения для прогиба. Благодаря ему происходит переход от одной функции Крылова к другой. Эти соотношения имеют следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dx} V_1(\beta x) = -4\beta V_4(\beta x); \\ \frac{d}{dx} V_2(\beta x) = \beta V_1(\beta x); \\ \frac{d}{dx} V_3(\beta x) = \beta V_2(\beta x); \\ \frac{d}{dx} V_4(\beta x) = \beta V_3(\beta x); \end{array} \right. \quad (4)$$

$$V_1(0)=1; V_2(0)=0; V_3(0)=0; V_4(0)=0 \quad (5)$$

Используя (1) и (2) при учете (3), (4), (5), запишем следующее:

$$\omega_0 = B_1 + \bar{\omega}_0 \quad (6)$$

$$g_0 = \beta B_2 + \bar{\omega}'_0 \quad (7)$$

$$M_{x0} = D(\beta^2 B_3 + \bar{\omega}''_0) \quad (8)$$

$$Q_0 = D(\beta^3 B_4 + \bar{\omega}'''_0) \quad (9)$$

Выразив из (6), (7), (8), (9) константы  $B_1, B_2, B_3, B_4$  и подставив их в (2), получим выражение для прогиба, которое записано через начальные параметры, с использованием функций Крылова.

$$\omega = (\omega_0 - \overline{\omega_0})V_1(\beta x) + \frac{1}{\beta}(\mathcal{Q}_0 - \overline{\omega_0'})V_2(\beta x) + \frac{1}{\beta^2}\left(\frac{M_{x_0}}{D} - \overline{\omega_0''}\right)V_3(\beta x) + \frac{1}{\beta^3}\left(\frac{Q_0}{D} - \overline{\omega_0'''}\right)V_4(\beta x) + \varpi$$

Так как в данной задаче  $p = const$ , а  $T_x = 0$ , то производные от частного решения равны 0. Частное решение при  $x=0$  тоже равно 0, а при значении  $x=s$ , оно будет записываться с использованием первой функции Крылова.

В рассматриваемой задаче при  $x=0$  имеем жесткую заделку в которой прогиб и угол поворота равны 0. Вторые два начальных условия – момент и перерезывающая сила могут быть определены из граничного условия на правом конце. Так как в задаче нагрузка приложена не на всю длину оболочки, то решение разбивается на два участка.

$$\omega(x) = \begin{cases} \omega 1(x) = \frac{1}{\beta^2} \frac{M_{x_0}}{D} V_3(\beta x) + \frac{1}{\beta^3} \frac{Q_0}{D} V_4(\beta x) & 0 \leq x \leq s-a \\ \omega 2(x) = \frac{1}{\beta^2} \frac{M_{x_0}}{D} V_3(\beta x) + \frac{1}{\beta^3} \frac{Q_0}{D} V_4(\beta x) + \frac{pr^2}{Eh} (1 - V_1(\beta(x-(s-a)))) & s-a \leq x \leq s \end{cases}$$

### 3. Результаты

График для прогиба, деформаций, напряжений в осевом и окружном направлениях представлены на рис.2 соответственно.

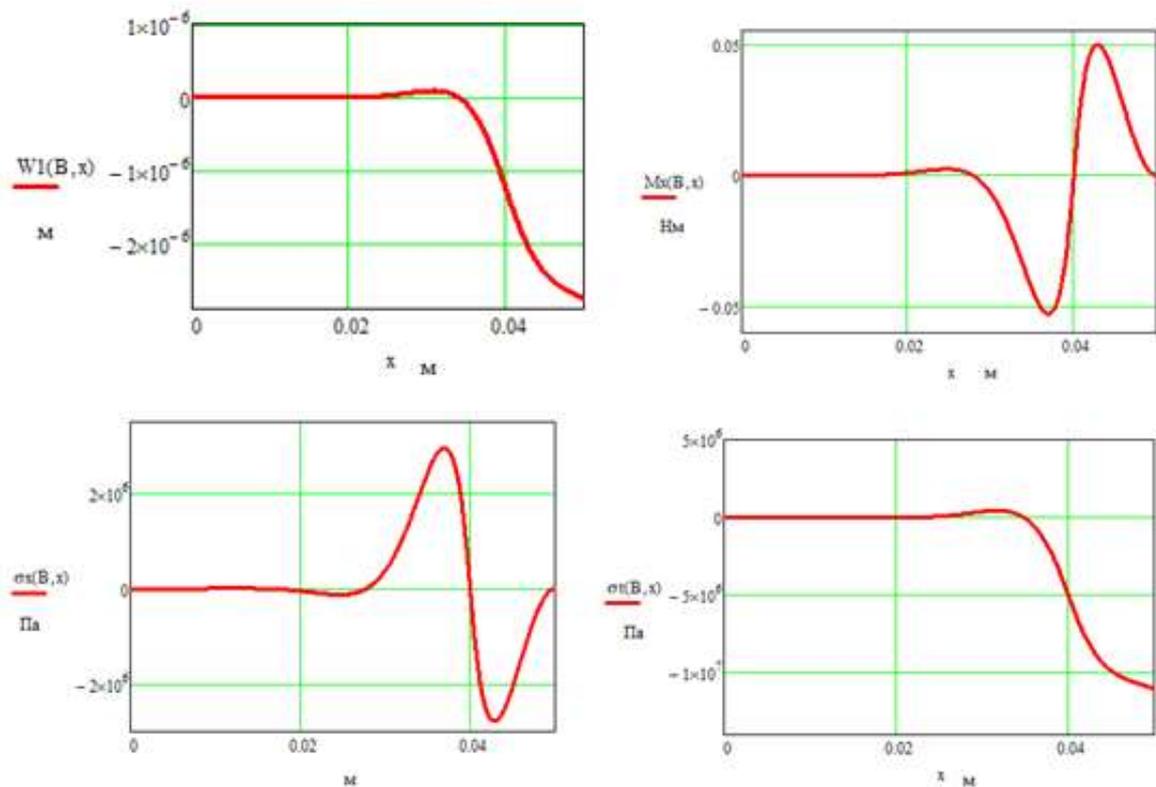


Рис. 2. Графики прогиба, деформаций, напряжений в осевом и окружном направлениях соответственно

Результаты в программе ANSYS представлены на рис.3.

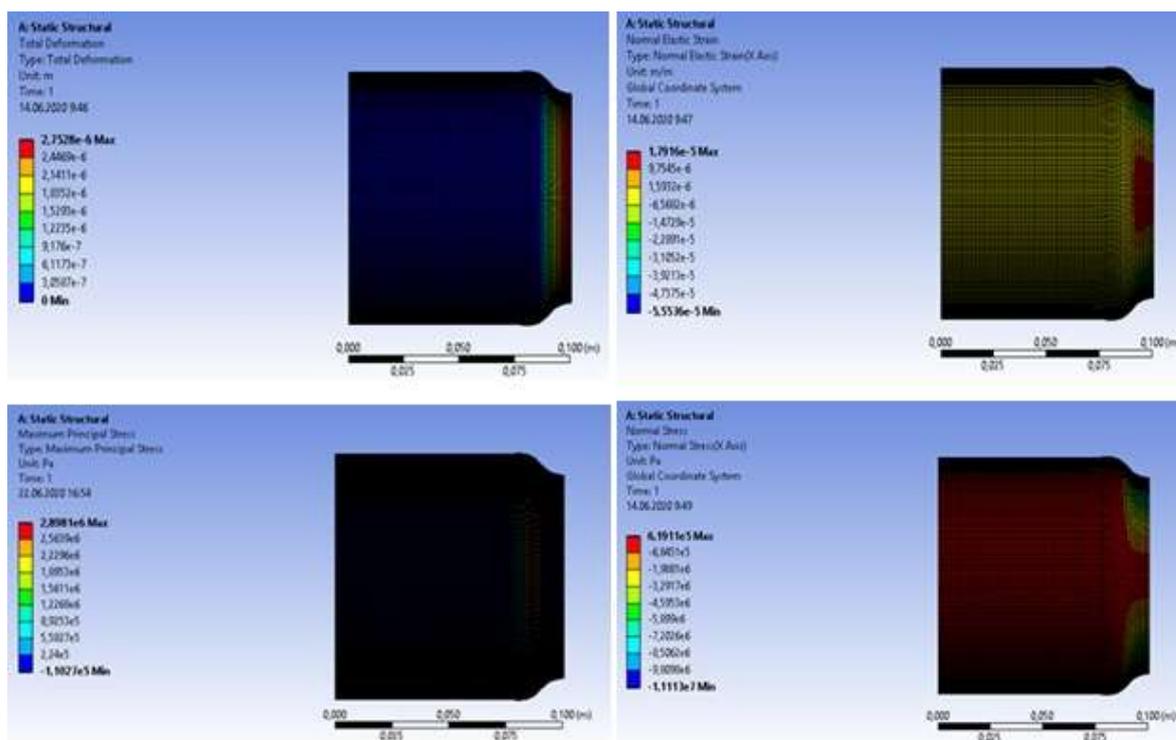


Рис. 3. Результаты в программе ANSYS

Результаты вычисления максимальных параметров полученные двумя способами для короткой оболочки представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты вычисления максимальных параметров

Максимальные параметры	Аналитический способ	В программе ANSYS
Перемещение (м)	$-2.764 \cdot 10^{-6}$	$-2.7528 \cdot 10^{-6}$
Деформация	$-5.528 \cdot 10^{-5}$	$-5.5536 \cdot 10^{-5}$
Окружное напряжение (Па)	$-1.068 \cdot 10^7$	$-1.1113 \cdot 10^7$
Осевое напряжение (Па)	$2.96 \cdot 10^6$	$2.8981 \cdot 10^6$

#### 4. Выводы

Погрешность в вычислениях не превышает 5%. Используя функции Крылова и метод начальных параметров для расчета коротких цилиндрических оболочек, в аналитическом решении, получаются довольно точные результаты, которые с допустимой погрешностью сходятся с результатами, которые получились в программе ANSYS.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабушка И., Витасек Э., Прагер М. Численные процессы решения дифференциальных уравнений./ Марчук П. И. - М.: Мир, 1969- 368с.
2. Бидерман В.Л. Механика тонкостенных конструкций. Статика.- М.: Машиностроение, 1977- 488 с.
3. Биргер И.А. Круглые пластинки и оболочки вращения.- М.: Оборонгиз, 1961- 368 с.
4. Бояршинов С.В. Основы строительной механики машин. Учебное пособие для студентов вузов.- М.: Машиностроение, 1973- 456 с.
5. Власов В.З. Тонкостенные пространственные системы. Изд. 2-е, М.:Стройгиз, 1958-502 с.

## CALCULATION OF PARAMETERS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A CYLINDRICAL SHELL UNDER AXISYMMETRIC LOADING

**Tomshin Viktor Mikhailovich <sup>1</sup>, master's student; Pel Alexander Nikolaevich <sup>1</sup>, associate Professor**

<sup>1</sup> Novosibirsk state technical University, 20 Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russia, tel. (383)346-31-21

**Tomshin V. M.**, email [wiktom@mail.ru](mailto:wiktom@mail.ru)

**Pel A. N.**, e-mail [pel@corp.nstu.ru](mailto:pel@corp.nstu.ru)

*Correspondence address:* **Viktor Mikhailovich Tomshin**, Novosibirsk state technical University, 20 Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russia, tel. +7(923)777-32-87

### **Abstract**

The article presents the results of determining the deflection, strain, and stress for a short cylindrical shell under axisymmetric loading, and calculations of maximum values of these parameters. The analytical solution of the problem is based on solving a differential equation that includes four arbitrary constants. There is a way in which it will be possible to solve a system of only two equations instead of four. This method is based on using Krylov functions, their properties, and writing expressions using initial parameters. Accordingly, the task is reduced to finding these constants. The analytical solution of the problem was made in the MathCAD program. To confirm the results obtained, this problem was solved using the software for engineering analysis and numerical modeling in ANSYS. The results obtained by these two methods of solutions coincided within the margin of error.

### **Keyword**

Stresses, deformations, deflection, analytical solution, Krylov functions, initial parameters.

## О РАСЧЕТЕ СОВМЕСТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРОВОДОВ И ОПОР ВЛ

*Шелевая Дарья Руслановна, магистрант; Красноуцкий Дмитрий  
Александрович, к.т.н., доцент*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия,  
г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (953)888-61-44

*Шелевая Д. Р.*, e-mail [shelevayad@mail.ru](mailto:shelevayad@mail.ru)

*Красноуцкий Д. А.*, e-mail [krasnorutskiy@corp.ntsru.ru](mailto:krasnorutskiy@corp.ntsru.ru)

*Адрес для корреспонденции: Красноуцкий Дмитрий Александрович,*  
Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия,  
г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (953)888-61-44

### **Аннотация**

В данной статье описана методика расчета совместных колебаний проводов и опор воздушной линии электропередачи. Для моделирования динамики проводов с обледенением используется дифференциальная модель стержня. Колебания опор описываются редуцированными конечно-элементными моделями. Предлагаемый подход позволяет определять не только области неустойчивых колебаний системы провода-опоры (пляска проводов) на основе анализа частот малых колебаний относительно достигнутого квазистатического состояния равновесия в потоке воздуха, но и рассчитать полную картину развития и установления квазипериодических колебаний и оценить их амплитуду как по перемещениям, так и по напряжениям. Приведен пример такого расчета на примере однофазной линии, состоящей из двух пролетов с одной промежуточной опорой П110-3.

**Ключевые слова:** воздушные линии электропередачи; пляска проводов; дифференциальная модель стержня; малые колебания; нелинейные колебания; обледенение провода

### **1. Введение**

Мировая практика эксплуатации воздушных линий электропередачи (ВЛ) показывает, что статический расчет на прочность не всегда позволяет обеспечить требуемый ресурс. Это можно объяснить тем, что ВЛ является динамической системой, для которой характерны как циклические напряжения (которые необходимо учитывать при расчете прочности) так и автоколебания, которые называются пляской проводов [1-3], которая считается основной причиной обрыва проводов. Такие колебания происходят обычно в зимнее время, когда на провода налипает снег, это создает аэродинамический профиль

проводу и даже постоянный ветер приводит к периодическим движениям вверх-вниз проводов с растущей амплитудой. Кроме обрыва проводов существует проблема разрушения опор, которая происходит даже в летнее время. Такие разрушения можно объяснить накопленной усталостью материала из-за динамических периодических воздействий.

Научным сообществом с различным успехом предпринимаются попытки моделировать совместные колебания проводов и опор: строятся как динамически подобные модели уменьшенного размера, так и различные математические модели [4-11]. Обычно провода моделируют цепной или нитевой моделями, используется метод конечных элементов. Исходя из сказанного выше, можно констатировать, что расчет колебаний проводов и опор является актуальной задачей.

На кафедре «Прочность летательных аппаратов» Новосибирского государственного технического университета совместно с ООО "Иээ НГТУ" с 2016 года ведется научная работа, направленная на исследование динамических явлений в системе провода-опоры ВЛ. Выполнена НИР по заказу ОАО «Томская распределительная компания» в 2016-2017 г. Математической основой этой работы является дифференциальная модель стержня, созданная профессором кафедры Левиным В. Е. [12-14], а также метод конечных элементов (в пакете ANSYS), используемый для создания упруго-массовых моделей металлических опор ВЛ. Целью работы является создание программного комплекса для расчета совместных колебаний проводов и опор ВЛ, с помощью которого можно будет исследовать динамические процессы, происходящие в реальных линиях, выявлять опасные режимы как сочетание разных факторов, установить уровень циклических напряжений в металлоконструкциях опор, прогнозировать поведение при экстремальных ветровых нагрузках и др.

## 2. Методика расчета совместных колебаний

Для моделирования колебаний проводов используется система геометрически нелинейных дифференциальных уравнений движения тонкого упругого стержня, которая является системой дифференциальных уравнений в частных производных по естественной координате стержня и времени [13]:

$$\frac{d\mathbf{X}}{d\xi} = \mathbf{F}(\xi, \mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}}), \quad (1)$$

где вектор неизвестных состоит из 12 функций длины и времени:

$$\mathbf{X}(\xi, t) = \{U_{1,2,3}(\xi, t), \omega_{1,2,3}(\xi, t), Q_{1,2,3}(\xi, t), M_{1,2,3}(\xi, t)\}^T.$$

Неизвестными являются глобальные проекции вектора перемещений каждой точки осевой линии стержня, вектора поворота, вектора внутренних усилий и моментов. С помощью метода прямого интегрирования производные по времени в (1) аппроксимируются через узловые значения неизвестных функций, и (1) преобразуется в систему обыкновенных дифференциальных

уравнений первого порядка. Решается краевая задача численным алгоритмом, описанным в [13]. Этот алгоритм позволяет решать краевую задачу с наперед заданной точностью и использовать вектор конечного поворота для описания любых поворотов без ограничений в  $2\pi$ . Стержень-провод нагружается весом, инерцией, аэродинамическими силами от набегающего потока воздуха на профиль провода с обледенением [15]. Возможно задать внутреннее и внешнее демпфирование, если имеются экспериментальные данные.

Линейные движения опоры ЛЭП описываются редуцированной конечно-элементной (КЭ) моделью, полученной одним из методов покомпонентного модального синтеза из полноразмерной КЭ-модели опоры ВЛ. Нелинейная динамика системы стержней-проводов и стержней-изоляторов определяется из решения нелинейной краевой задачи для системы дифференциальных уравнений (1). На каждом шаге по времени находится динамическое равновесие системы стержней, закрепленной в узлах конденсации, при этом в процессе численного решения системы нелинейных уравнений (полученной после дискретизации дифференциальных уравнений) условия крепления для стержней-изоляторов зависят от внутренних усилий в этих точках. С вычислительной точки зрения уравнения краевых условий для стержней зависят теперь не только от перемещений соответствующих торцов стержней-изоляторов, как в случае простого крепления (неподвижного), но и от внутренних усилий в этих точках. А связь между внутренними усилиями и перемещениями узлов крепления задается редуцированной КЭ-моделью опор.

### **3. Численные результаты моделирования**

В результате расчета совместных колебаний для каждого дискретного момента времени определяются перемещения, внутренние усилия и моменты в стержнях-проводах, а также перемещения узлов конденсации редуцированной КЭ-модели – точек крепления гирлянд изоляторов к опоре ВЛ. Для расчета совместных колебаний при пляске проводов был взят профиль наледи с определенными зависимостями аэродинамических коэффициентов от угла атаки [15]. Для тестирования алгоритмов был рассмотрен расчет совместных колебаний двух пролетов длиной 370 м каждый, состоящих из трех проводов (фаза) с одной промежуточной опорой П110-3. Марка провода – АС-150 с налипшим льдом одного профиля трёх типоразмеров (3, 6 и 10 см). В начале и конце линии стержни-провода были жестко заземлены, а в середине подвешены на гирляндах изоляторов (по 30 кг каждый) к редуцированной КЭ-модели опоры П110-3. При редуцировании модели опоры сохранены 3 низших тона собственных колебаний – два изгиба и кручение.

Для каждого из трех типоразмеров наледи предварительно проводится анализ частот малых колебаний для разных скоростей потока воздуха (от 0 до 30 м/с) на основе линеаризованных уравнений (1). По знаку мнимых составляющих рассчитанных частот можно судить об устойчивости достигнутого квазистатического состояния. Так были определены области неустойчивости. Для нескольких скоростей потока из области неустойчивости

проводился расчет совместных нелинейных колебаний провода с обледенением и опоры ВЛ, при этом для каждого расчета скорость потока была постоянной, а начальная конфигурация взята из квазистатического расчета на 99% скорости от выбранной, чтобы обеспечить малое начальное возмущение. С течением времени от начального возмущения система провода-опора постепенно выходит на значительно большие по сравнению с начальным возмущением квазипериодические (хаотические) колебания, в которых можно найти условную амплитуду колебаний (рис.1). Для этих двух моментов времени из расчета известны перемещения точек крепления гирлянд к опоре, эти перемещения прикладываются к полноразмерной КЭ-модели опоры и рассчитываются напряжения (рис.2). На рис. 1 и 2 приведены результаты из расчета для наледи размером 10 см при скорости потока 15 м/с. Приведенные на рис. 2 области максимальных напряжений соответствуют двум характерным местам разрушения реальных опор ВЛ: в нижней части конструкции и в области траверсы.

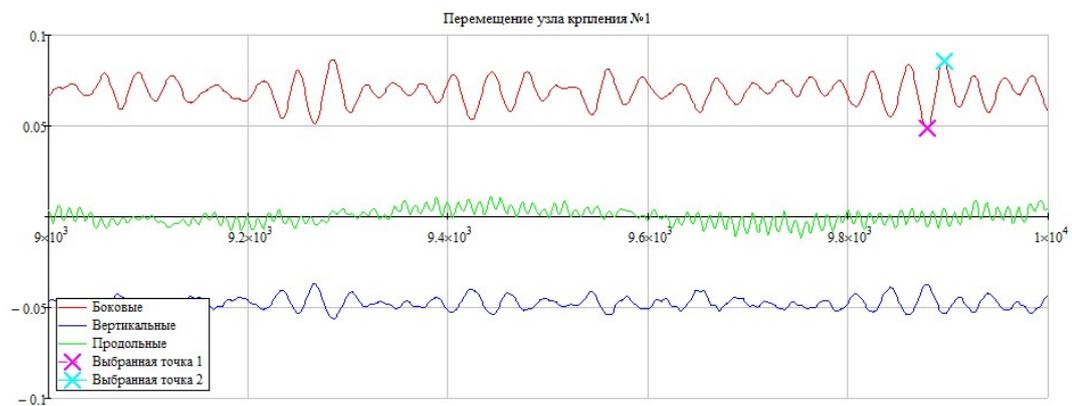


Рис. 1. Пример рассчитанной зависимости перемещения одной точки крепления гирлянды

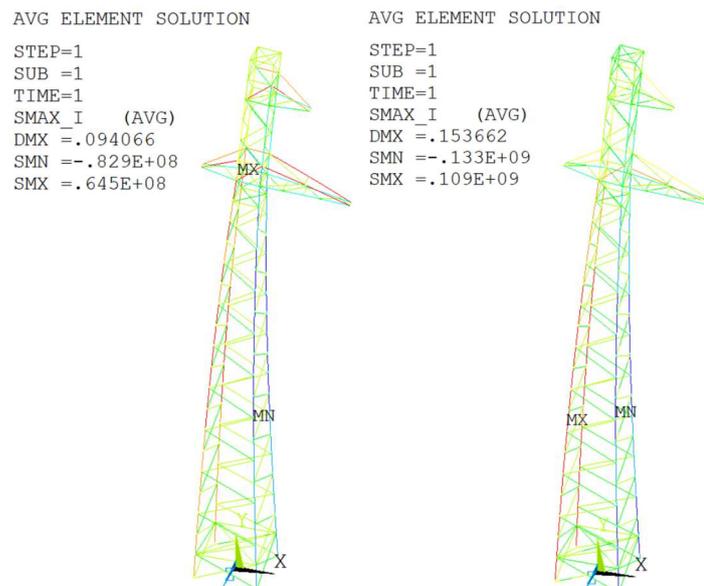


Рис. 2. Напряжения в опоре П110-3 для двух моментов времени при пляске проводов

В рассмотренном примере был выделен наиболее опасный режим колебаний и для двух моментов времени в установившемся режиме колебаний рассчитаны напряжения в полноразмерной КЭ-модели опоры П110-3. Размах циклических напряжений составил порядка 50 МПа. Такой перепад напряжений существенно влияет на ресурс металлоконструкции, поэтому при проектировании и расчете долговечности ВЛ необходимо учитывать совместные колебания проводов и опор.

### **3. Выводы**

Проведенные в рамках данной работы исследования колебаний проводов ВЛ не обладают общностью, но показывают работоспособность программного комплекса для проведения такого анализа в будущем и выявления общих закономерностей и выработке рекомендаций по защите электросетей от преждевременного выхода из строя. Возможными рекомендациями при проектировании новых линий могут быть, например, рекомендуемая длина пролета для определенного сочетания собственных частот опоры и механических характеристик проводов, чтобы избежать резонансных колебаний при наиболее вероятных погодных условиях (для определенных размеров наледи и скорости ветра). При оценке остаточного ресурса уже существующих электросетей, теоретически можно будет воспользоваться оценкой возможных колебаний напряжений в опорах, рассчитав наиболее опасные режимы колебаний для известной истории климатических параметров для данной местности.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ловецкая Е.Н., Савваитов Д.С., Шкапцов В.А. Анализ случаев пляски проводов ВЛ 10-1750 кВ.– Электрические станции, №2 1987 г. С.27-35.
2. Вершков В.А., Глебов Э.С., Малышев Р.А. Пляска проводов на линиях электропередачи 400-500 кВ. – Электрические станции, 1963, № 10. С.63-69.
3. Исследование аэроупругих колебаний провода, вызываемых отрывным вихревым обтеканием / О.А. Иванова [и др.] // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. Ч. 2, № 4. С. 157-159.
4. Kalman T. Dynamic behavior of iced cables subjected to mechanical shocks. – Université du Québec, 2007. – 219.
5. Farshad M. Modelling the Dynamic Response of Iced Transmission Lines Subjected to Cable Rupture and Ice Shedding. / M. Farshad, C. Ghyslaine, F. Masoud.: 2013. – 7.
6. Kunpeng Ji, Bin Liu, Yongfeng Cheng, Xueping Zhan, Ghyslaine McClure. Evaluation and optimization of a shock load de-icing method for transmission lines with combined ice failure criteria. – Cold Regions Science and Technology.: 2019 – 10.

7. Hooman Keyhan, Ghyslaine McClure, Wagdi G. Habashi. Dynamic analysis of an overhead transmission line subject to gusty wind loading predicted by wind-conductor interaction. – Computers and Structures, 2013 – P. 135-144.
8. Alok D. Dynamic Analysis of Overhead Transmission Line under Turbulent Wind Loading. / Alok Dua, Mathias Clobes, Thomas Höbbel.: 2015 – 9.
9. McClure G. Modeling the structural dynamic response of overhead transmission lines. / G. McClure, M. Lapointe.: McGill University, Canada, 2003 – 10.
10. Rutman Yu.L., Meleshko V.A. Estimation the structure on galloping fluctuation possibility. Magazine of Civil Engineering. 2011. No. 6. P. 5-11. (rus).
11. Шклярчук Ф. Н. Нелинейные колебания и галопирование провода с обледенением / Шклярчук Ф. Н., Данилин А. Н. // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 11. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. – С. 188-197.
12. Механика деформирования криволинейных стержней. : монография / Н. В. Пустовой, В. Е. Левин. - : Новосибирск, изд. НГТУ, 2008. - 208 с.
13. Pustovoy N. V. The numerical algorithm for solving the nonlinear boundary problem of the thin rod under dynamic deformations / N. V. Pustovoy, V. E. Levin, D. A. Krasnorutskiy // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика = PNRPU Mechanics Bulletin. - 2018. - № 3-4. - С. 77-87. - DOI: 10.15593/perm.mech/eng.2018.3.08.
14. Расчет совместных колебаний проводов и опор участка воздушной линии электропередачи при действии периодической ветровой нагрузки = Joint oscillations calculation of conductors and transmission poles within section of an overhead transmission line under the action of periodic wind load / А. Я. Кравченко, Д. А. Красноруцкий, В. Е. Левин, С. В. Роденко // Электроэнергия. Передача и распределение. - 2018. – № 2 (47). – С. 58–63.
15. Ванько В.И., Марчевский И.К., Щеглов Г.А. Численно-аналитический метод исследования устойчивости положений равновесия профиля в потоке // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Естественные науки. 2011. Вып. S. С. 3-10

## **ABOUT CALCULATION OF COUPLED VIBRATIONS OF CABLES AND TOWERS OF OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES**

***Shelevaya Daria R., Master Student; Krasnorutskiy Dmitry A., Associate Professor***

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk,  
630073, Russia, tel. +7-953-888-61-44

***Shelevaya Daria R., e-mail [shelevayad@mail.ru](mailto:shelevayad@mail.ru)***

***Krasnorutskiy Dmitry A., e-mail [krasnorutskiy@corp.ntsru.ru](mailto:krasnorutskiy@corp.ntsru.ru)***

## **Abstract**

This paper is about the method for calculating the coupled vibrations of cables and towers of overhead power transmission line. A differential rod model is used to model the dynamics of iced cables. Tower's vibrations are simulated by reduced finite element models generated by component mode synthesis method (CMS). The proposed approach makes it possible to determine not only the areas of unstable vibrations of the cables-tower system (conductor dancing) based on the analysis of the frequencies of small vibrations near achieved quasi-static state of equilibrium in the air flow, but also to calculate the full distribution of evolution and establishment of quasi-periodic vibrations and estimate their amplitude both in terms of displacements and stresses. An example of such a calculation is given on the example of a single-phase line consisting of two spans with one intermediate tower P110-3.

**Keywords:** conductor dancing; galloping; differential rod model; small vibrations; nonlinear vibrations; wire icing

**УДК 531.76:534.134:534.141.2**

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СОСТАВНОЙ ПРЕГРАДЫ НА ФОРМИРУЕМОЕ УДАРНОЕ НАГРУЖЕНИЕ**

*Шлишевский Антон Владимирович; Проскурин Анатолий  
Викторович, доктор техн. наук*

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский  
Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-  
исследовательский институт технической физики имени академика Е. И.  
Забабахина

(ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина»),  
Россия, 456770, Челябинская область, г. Снежинск, ул. Васильева, 13, а. я.  
245

*Проскурин А.В., email [niik@vniitf.ru](mailto:niik@vniitf.ru)  
Шлишевский А.В., email [niik@vniitf.ru](mailto:niik@vniitf.ru)*

Адрес для корреспонденции: *Шлишевский Антон Владимирович,*  
«РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», Россия, 456770,  
Челябинская область, г. Снежинск, ул. Васильева, 13, а. я. 245

**Аннотация:** данная работа посвящена оценке влияния колебаний составной преграды на ускорения объекта испытаний при ударных нагрузениях в лабораторных условиях. Предложен способ корректировки сигнала ускорения, зарегистрированного на объекте испытаний, путем

цифровой полосовой фильтрации, исключая влияние колебаний составной преграды.

**Ключевые слова:** железобетонная преграда, ударное нагружение, продольные колебания, пьезоакселерометр, цифровая фильтрация, спектральная плотность.

### Введение

Ударные нагружения в лабораторных условиях формируются за счет взаимодействия объекта испытаний (ОИ) и тормозного устройства (преграды) [1, 2]. При размерах тормозного устройства (преграды) соизмеримых с ОИ, собственные частоты колебаний тормозного устройства, возбуждаемые в процессе взаимодействия ОИ и тормозного устройства (преграды), могут находиться в диапазоне собственных частот колебаний ОИ. Определение в спектре сигнала, зарегистрированного на ОИ, частот, вызванных колебаниями тормозного устройства (преграды) или испытательной оснастки, поможет более качественно оценивать ударное нагружение ОИ и его соответствие реальным условиям эксплуатации. Целью данной работы является оценка влияния колебаний составной преграды на ускорения ОИ, взаимодействующего с ней.

### Ударное испытание

Ударному нагружению подвергался ОИ длиной 4 метра. Нагрузка формировалась за счет взаимодействия ОИ и преграды.

Преграда представляет собой сооружение из железобетонных блоков с внутренним армированием рисунок 1. Материал ОИ – сталь, блоков типа 1 – бетон М400, типа 2 и 3 – М300.

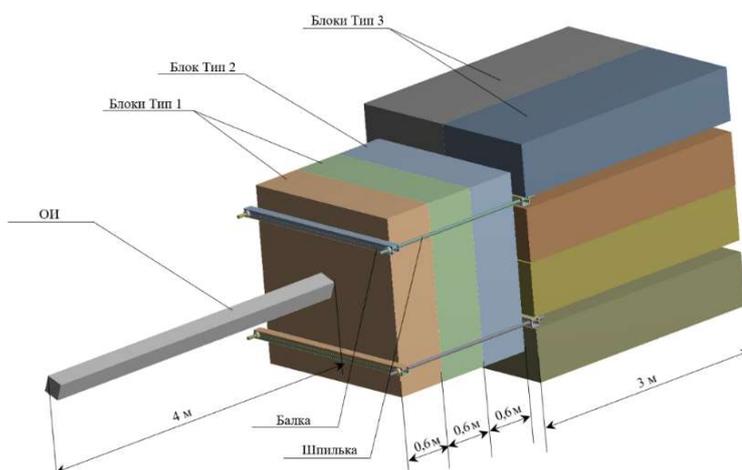


Рис. 1. Внешний вид преграды

Для регистрации ускорений вблизи торца ОИ, противоположного зоне удара, были установлены 4 пьезоакселерометра с условными обозначениями 1X, 2X, 3X, 4X.

Зарегистрированные пьезоакселерометрами сигналы приведены на рисунке 2. Спектральные плотности сигналов, показанных на рисунке 2, приведены на рисунке 3. Для детализации графиков спектральных плотностей исключим из рассмотрения диапазон от 0 до 77 Гц, характеризующий ударное нагружение импульсом длительностью 13 мс ( $f_{\text{удар.нагр}}=1/\tau_{\text{ср}}=1000/13=77$  Гц). Рассматривались только пики, амплитуды которых отвечали условию  $A > 0.1A_{\text{max}}$ , где  $A_{\text{max}}$  – амплитуда максимального пика.

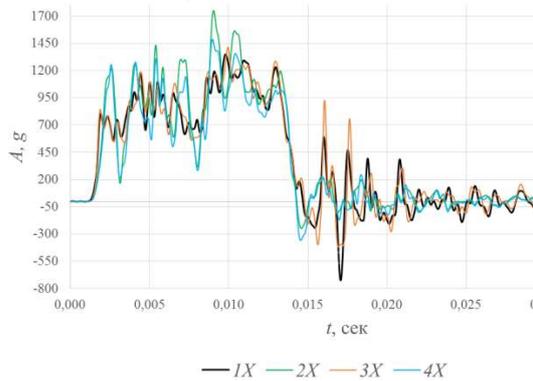


Рис. 2. Графики зарегистрированных ударных ускорений

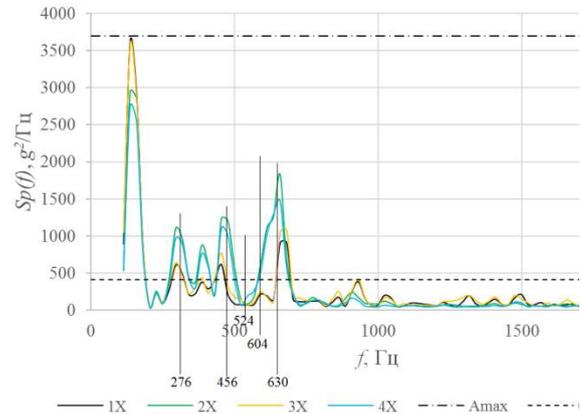


Рис. 3. Спектральные плотности сигналов

### Расчетные исследования

Рассмотрим блоки преграды и ОИ как совокупность стержней разной длины.

Известно, что первая частота продольных колебаний стержня со свободными концами определяются по формуле (1)

$$f = \frac{a}{2l}, \quad (1)$$

где  $l$  - длина стержня, м;  $a$  - скорость волны в стержне (м/с).

При возбуждении составной преграды ударная волна, распространяясь, увлекает в колебательный процесс части преграды. На границе частей преграды волна делится на отраженную волну и проходящую волну. Отраженная волна движется в направлении противоположном первоначальному направлению движения. Проходящая волна продолжает движение в первоначальном направлении до следующей границы. Таким образом, расстояние до границы каких-либо элементов преграды определяет длину  $l$  условного стержня, которая используется для определения частоты продольных колебаний по (1). В таблице 1 приведены номера границ, определяющих собственные частоты колебаний преграды, составные части преграды, размеры, которые определяют расстояние до этих границ, и значение параметра  $l$  для этих границ.

Таблица 1

Номера границ и составные части преграды, размеры которых определяют расстояние до границы

№ границы	Состав	, м	Частота, Гц	Средние значения частот пиков, Гц	, %
1	ОИ		30	645,8	.3
2	ОИ + блок Тип1	,6	04		
3	ОИ + два блока Тип1	,2	24		
4	ОИ + два блока Тип1+ блок Тип 2	,2	56	433,3	.3
5	ОИ + два блока Тип1 + блок Тип 2 + блоки Тип 3	2,2	76	272,5	.3

Рассматривая ОИ как стальной стержень и применяя формулу (1) к границе № 1, найдем самую высокую частоту продольных колебаний.

Рассмотрим следующие границы. Общим для границ № 2,...,№ 5 является то, что движение волны до этих границ происходит по составным частям преграды с разными скоростями, определяемыми свойствами этих составных частей. Из (1) следует, что частота продольных колебаний определяется временем прохождения волны по стержню. Таким образом, частоты продольных колебаний, определяемые границами № 2,...,№ 5 можно определить по формуле (2)

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\sum_{k=1}^N \frac{2l_k}{a_k}}, \quad (2)$$

где  $T$  – период колебания, с;  $a_k$  – скорость волны в  $k$ -ой составной части преграды, м/с;  $l_k$  – длина  $k$ -ой составной части преграды;  $N$  – номер границы.

Результаты расчётов частот приведены в таблице 1. Сравним расчетные значения частот продольных колебаний составной преграды и средние значения частот пиков на спектральной плотности сигналов пьезоакселерометров, показанных на рисунке 3. Результаты сравнения приведены в таблице 1. Можно предположить, что расчетные частоты продольных колебаний 524 Гц и 604 Гц не выделяются на графиках спектральных плотностей сигналов ускорений в виде пиков по двум причинам:

1. Недостаточно высокая частота дискретизации при регистрации сигнала ускорений равная 120 кГц.

2. На границах 2, 3, за счет стяжки блоков Типа 1 и Типа 2 с помощью балки и шпилек, улучшается взаимное прилегание блоков, что уменьшает амплитуду отраженных волн на границах 2 и 3.

Очевидно, что при соударении с полубесконечной преградой на сигнале, зарегистрированном на объекте испытаний, не должно наблюдаться пиков на частотах 276 Гц и 456 Гц. Чтобы спрогнозировать вид сигнала

пьезоакселерометров на ОИ при соударении с полубесконечной преградой проведем фильтрацию сигналов, показанных на рисунке 2, заградительными фильтрами Баттерворта 10-ого порядка с полосами частот  $276 \pm 27,6$  Гц и  $456 \pm 45,6$  Гц.

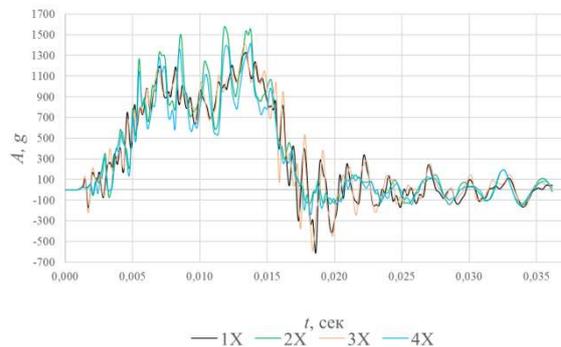


Рис. 4. Результаты цифровой фильтрации сигналов ускорений

Полученные сигналы приведены на рисунке 4.

Сравнивая средние значения амплитуды и длительности, можно видеть, что амплитуда ускорения после фильтрации уменьшилась на 4,6 %, а длительность возросла на 10 %.

**Закключение:** сравнением расчетных и экспериментальных данных показано, что нагрузка, регистрируемая на ОИ, взаимодействующем с составным тормозным устройством (преградой), содержит составляющую, определяемую колебаниями тормозного устройства (преграды) на собственных частотах. Это надо учитывать и при изучении реакции ОИ на ударное нагружение, и при имитации соударения с реальными (полубесконечными) преградами в лабораторных условиях выбирая размеры и конструкцию тормозных устройств (преграды) такими, чтобы минимизировать эту составляющую.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Saquib, D. K. Sahoo, P.Srivastava, A. K. Kohli, G. Ganesh. Performance of BLC-200 cask under 9m drop test. 11th International Symposium on Plasticity and Impact Mechanics, Implast 2016. Procedia Engineering 173 (2017) 455 – 462.
2. А.О. Грабилин, Б.И. Зубренков, М.В. Пустобаев, А.Д. Судомоев, А.В. Шматков. Моделирование режимов ударного нагружения на аппаратуру космического аппарата при срабатывании пиротехнических средств разделения. «Вопросы электромеханики», 2014.Т. 138, с. 35-42.

## EVALUATION OF THE INFLUENCE OF OWN OSCILLATIONS OF THE COMPOSITE BLOCK ON THE FORMED SHOCK LOAD

*Shlishevskiy Anton Vladimirovich; Proskurin Anatoliy Viktorovich,  
D.Sc. (Engineering)*

**Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center–  
Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics (FSUE «RFNC-  
VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin»»), Russia, 456770, Chelyabinsk  
Region, Snezhinsk, Vasileva ul. 13, p/o box 245.**

*Proskurin A.V., email [niik@vniitf.ru](mailto:niik@vniitf.ru)*

*Shlishevskiy A.V.*, email [niik@vniitf.ru](mailto:niik@vniitf.ru)

Address for correspondence: *Shlishevskiy Anton Vladimirovich*, Russian Federal Nuclear Center– Zababakhin All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics, Russia, 456770, Chelyabinsk Region, Snezhinsk, Vasileva ul. 13, p/o box 245.

**Abstract:** this work is devoted to assessing the effect of vibrations of a composite obstacle on the acceleration of the test object under shock loads in laboratory conditions. A method is proposed for adjusting the acceleration signal recorded at the test object by digital bandpass filtering, eliminating the influence of vibrations of the composite obstacle.

**Keywords:** reinforced concrete block, shock loading, longitudinal vibration, piezoelectric accelerometer, digital filtering, spectral density.

# СЕКЦИЯ: ГИДРОАЭРОДИНАМИКА

УДК 533.69

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБТЕКАНИЯ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНОЙ МОДЕЛИ БПЛА ПРИ ПОПАДАНИИ В ВОЗМУЩЕННЫЙ ПОТОК

*Быков Антон Вячеславович<sup>1,2</sup>, студент; Павленко Александр Михайлович<sup>2</sup>; Занин Борис Юрьевич<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (913)005-48-19

<sup>2</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

*Быков А.В.*, email [bykov.4nton@yandex.ru](mailto:bykov.4nton@yandex.ru)

*Адрес для корреспонденции: Быков Антон Вячеславович*, 630066, Россия, г. Новосибирск, ул. Прокопьевска, 95, тел. (952)901-53-10

### Аннотация

В статье представлены результаты экспериментальных исследований, направленных на изучение влияния турбулентного следа на обтекание модели беспилотного летательного аппарата. Исследования проводились в дозвуковой аэродинамической трубе при низких числах Рейнольдса. Методы термоанемометрических и пневмометрических измерений являлись основными для получения численных данных. В качестве источника возмущений использовалась ворсистая нить. Измерения проводились при различных режимах. Нить натягивалась в рабочей части трубы на некотором удалении от модели. Были получены графики распределения статического давления и средней скорости над поверхностью модели. Полученные результаты показали существенное влияние турбулентного следа на обтекание модели.

### Ключевые слова

Ламинарный; турбулентный; отрыв потока; управление обтеканием; метод дренажных отверстий; визуализация обтекания.

### 1. Введение

В настоящее время одним из важнейших объектов изучения в области аэродинамики является проблема ламинарно-турбулентного перехода. Существует большое количество работ, посвященных данной проблеме, см., например, работы [1,2]. Зачастую объектом исследования в таких публикациях выступает крыло, как основной источник подъемной силы. Некоторые исследователи изучают способы повлиять на срыв потока на больших углах атаки  $\alpha$ , тем самым расширяя диапазон возможных углов  $\alpha$  для безопасной

эксплуатации летательного аппарата. Другие показывают возможность увеличения зоны присоединённого обтекания, устраняя область отрыва пограничного слоя и смещения области перехода вниз по потоку. Практическая ценность таких исследований состоит в возможности улучшения суммарных аэродинамических характеристик летательного аппарата – увеличения подъемной силы и снижения лобового сопротивления. Различные способы управления отрывом изложены в работе [3]. Управление отрывом с помощью точечных выступов на поверхности крыла описано в работе [4].

Трендом последних нескольких лет стало активное развитие области беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Это обосновано рядом причин. Одна из них, возможность не подвергает опасности человека. Существует большое количество задач, выполняемых БПЛА, это обуславливает разнообразие аэродинамических компоновок, по которым они проектируются. Например, аппарат, выполняющий задачу разведки или патрулирования выгодно спроектировать по схеме “летающее крыло”. При такой схеме весь корпус БПЛА является источником подъемной силы, что увеличивает аэродинамическое качество аппарата, а, следовательно, и его продолжительность полета.

Поскольку беспилотные летательные аппараты могут двигаться на низких высотах, велика вероятность попадания в возмущенный поток. В данной работе моделируется именно такая ситуация. Сравнивается обтекание крыла в невозмущенном и в возмущенном потоке. Была использована модель БПЛА, выполненная по схеме “летающее крыло”. В роли источника возмущений выступала ворсистая нить, закрепленная на некотором удалении от модели.

Настоящее исследование является продолжением цикла исследований, направленных на изучение ламинарно-турбулентного перехода [5-7]. Ранее, метод саже-масляной визуализации и термоанемометрических измерений показал существенное влияние внешних возмущений на обтекание.

## **2.Методика исследования**

Данная работа основана на экспериментальных данных полученных в дозвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 Института теоретической и прикладной механики СО РАН (Новосибирск, Россия). Данная установка относится к замкнутому типу с закрытой рабочей частью. Размер рабочей части составляет 1×1×4 м. Уровень турбулентности в рабочей зоне равняется 0,04%.

Эксперименты проводились с использованием трапецеидальной модели “летающее крыло” (рис.1). Исследования были направлены на получение данных об обтекании крыла при помощи нескольких способов. Во-первых, с помощью пневмометрических измерений распределения статического давления над крылом. Для этого были сделаны дренажные отверстия на поверхности

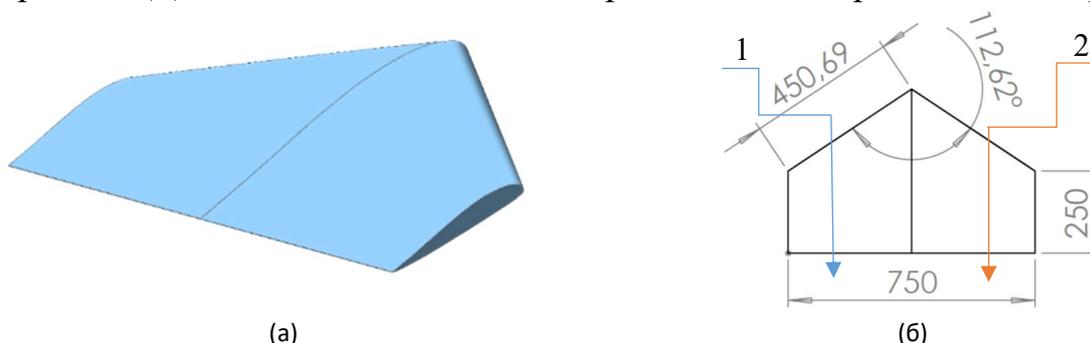


Рис.1. Модель БПЛА (а) и её геометрические размеры (б)

1 – расположение приемников статического давления, 2 – направление термоанемометрических измерений

крыла. Во-вторых, был использован метод термоанемометрических измерений средней скорости и пульсаций в пограничном слое. Измерения выполнялись как над верхней поверхностью модели, так и над нижней. Поскольку дренажные отверстия могут оказывать влияние на обтекание, термоанемометрические измерения проводились на другой половине крыла в сечении, расположенном симметрично относительно центрального профиля крыла. Удаление от центрального профиля равнялось  $\frac{1}{4}$  размаха.

В качестве источника возмущения использовалась ворсистая нить. Нить закреплялась на удалении от носика модели равном 95 мм. Скорость набегающего потока составляла  $V_\infty=15; 25$  м/с, угол атаки равнялся  $\alpha = 5; 18^\circ$ , соответственно.



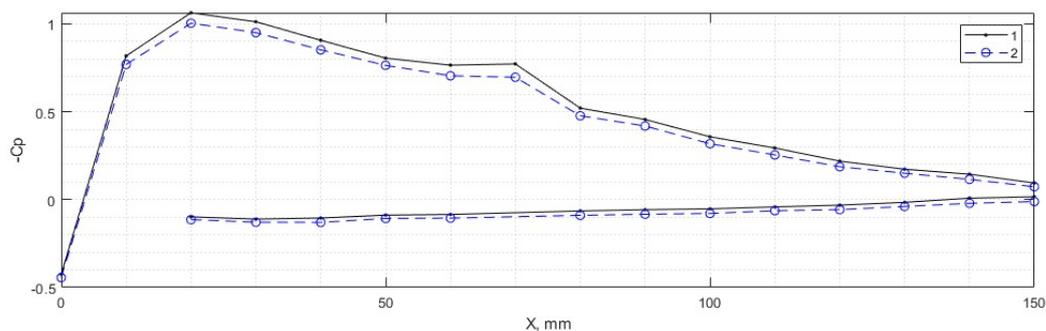
Рис.2. Схема постановки эксперимента. 1 – источник возмущений

### 3.Результаты

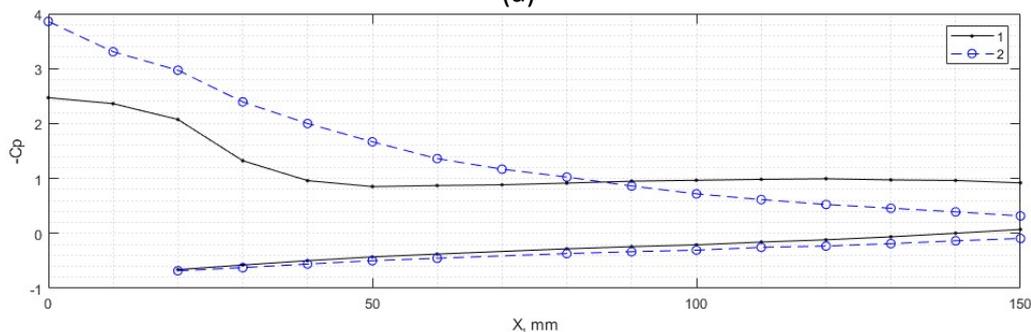
В рамках данной работы рассмотрим полученные результаты измерений. Первая серия измерений проводились при  $V_\infty=15$  м/с и  $\alpha = 5^\circ$ . На графике ниже видно, что попадание в возмущенный поток несущественно влияет на распределение статического давления (рис.4, а). Вторая серия велась при  $V_\infty=25$  м/с и  $\alpha = 18^\circ$ . На данном режиме наблюдается более существенно влияние на обтекание (рис.4, б). При таком угле атаки и обтекании свободным невозмущенным потоком установился срывной режим обтекания крыла. Об этом говорит равномерное распределение давления над верхней поверхностью при  $X = 40...150$  мм, а также подтверждает визуализация. Когда нить была

закреплена перед моделью, характер распределения давления существенно изменился. Наблюдается увеличение статического давления при движении от передней кромки к задней, что характерно для присоединённого обтекания. Результаты визуализации подтверждают, что произошло присоединение потока, срыв исчез [6].

В следующей части исследований измерялось распределение средней скорости и пульсаций в пограничном слое методом термоанемометрических измерений. Измерения проводились в нескольких точках по всей длине хорды. Измерения проводились при  $V_\infty=15$  м/с и  $\alpha = 5^\circ$ . Ниже представлены графики распределения скорости в пограничном слое (рис.5, а). Зависимости, полученные при обтекании свободным потоком, указывают на наличие отрывной зоны над поверхностью крыла при  $x/c = 0.15\dots 0.36$  ( $c$  – хорда). Далее обтекание становится присоединённым. Попадание модели в турбулентный след за нитью сильно повлияло на обтекание. Распределение скорости стало характерным для присоединённого обтекания по всей длине измерений, т.е. локальный отрывной пузырь исчез. Графики распределения пульсаций в пограничном слое показывают снижение амплитуды колебаний в случае с нитью (рис.4, б).

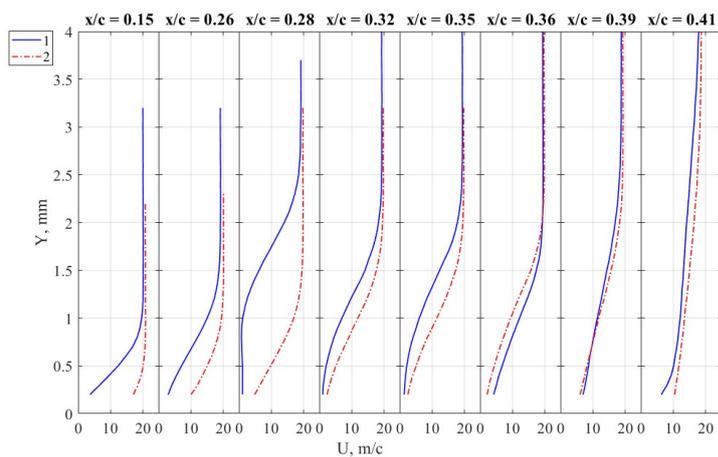


(а)

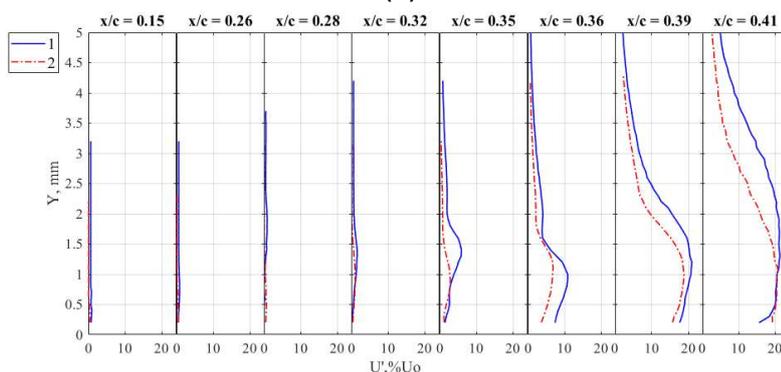


(б)

Рис.4. Графики распределения коэффициента статического давления при свободном обтекании (1) и попадании в возмущенный поток (2). (а) –  $V_\infty=15$  м/с,  $\alpha = 5^\circ$ ; (б) –  $V_\infty=25$  м/с,  $\alpha = 18^\circ$



(a)



(б)

Рис.5. Распределение средней скорости (а) и пульсаций (б) в пограничном слое при  $V_\infty=25$  м/с,  $\alpha = 18^\circ$ . 1 – свободный поток, 2 – действие нити

При большом угле атаки модели на режиме  $V_\infty=25$  м/с и  $\alpha =18^\circ$ , когда происходит срыв потока, термоанемометрические измерения провести не представлялось технически возможным из-за больших колебаний в области срыва. Датчик термоанемометра обладает высокой чувствительностью не только к динамическим изменениям в потоке, но и к механическому воздействию. Иными словами, при попытке проведения измерений на указанном режиме, несколько датчиков были сломано. Однако результаты визуализации и измерения статического давления над крылом показали, что в турбулентном следе обтекание крыла значительно изменяется, вплоть до полного устранения срыва.

#### 4.Вывод

Проведенные измерения показали, что различные виды отрывных течений (локальный отрывной пузырь, полный отрыв потока) обладают высокой чувствительностью к внешним возмущениям. Найдено, что попадание летающего крыла в турбулентный след значительно изменяет картину течения, распределение статического давления над его поверхностью и уровень колебаний в пограничном слое. Обнаружено, что возможно полное устранение срыва при нахождении крыла в возмущенном набегающем потоке.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя: [монография] / Г. Шлихтинг; – М.: Наука, Физматлит, 1969. – 744 с.
2. Voiko A.V., Grek G.R., Dovgal A.V., Kozlov V.V. The origin of turbulence in near-wall flows, Berlin: Springer, 2002. 267p.
3. Чжен П. Отрывные течения. В 3 т. Т. 1: [монография] / П. Чжен; – М.: Мир, 1972. – 300 с.
4. B. Yu. Zanin, V. V. Kozlov, and A. M. Pavlenko Control of Flow Separation from a Model Wing at Low Reynolds Numbers // Fluid Dynamics, 2012, Vol. 47, No. 3, pp. 403–410. DOI:10.1134/S0015462812030143
5. A.M. Pavlenko, B.Yu. Zanin, and M.M. Katasonov, “Laminar-turbulent transition on the flying wing model” in 18th International Conference on the Methods of Aerophysical Research, AIP Conference Proceedings 1770, edited by V.M. Fomin (American Institute of Physics, Melville, NY, 2016), pp. 030060. DOI: 10.1063/1.4964002.
6. A.M. Pavlenko, B.Yu. Zanin, and M.M. Katasonov, “Flow around a small-sized UAV model in a turbulent trace”, AIP Conference Proceedings 2027, pp. 040004. DOI: 10.1063/1.5065278.
7. A.M. Pavlenko, B.Yu. Zanin, A.V. Bykov and M.M. Katasonov, “Flow around the wing models with straight and swept leading edge in case of contact with turbulent wake”, XXXV Siberian Thermophysical Seminar 27–29 August 2019, Journal of Physics: Conference Series 1382, pp. 012030. DOI:10.1088/1742-6596/1382/1/012030

## INVESTIGATION OF THE FLOW FEATURES OF A TRAPEZOIDAL UAV MODEL WHEN IT ENTERS A DISTURBED FLOW

A.V. Bykov<sup>12</sup>, student; A.M. Pavlenko<sup>2</sup>; B.Yu. Zanin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Novosibirsk State Technical University, K. Marx Ave., 20, Novosibirsk, 630073, Russia, phone (913)005-48-19*

<sup>2</sup>*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Institutskaya str., 4/1, Novosibirsk, 630090, Russia*

**Bykov A.V.**, email: [bykov.4nton@yandex.ru](mailto:bykov.4nton@yandex.ru)

Correspondence address: Bykov Anton Vyacheslavovich, Prokopyevskaya str., 95, Novosibirsk, 630066, Russia, phone (952)901-53-10

### Annotation

The article presents the results of experimental investigations aimed at studying the effect of a turbulent wake on the flow around the model of an unmanned aerial

vehicle. The experiments were carried out in a low-turbulent subsonic wind tunnel at low Reynolds numbers. The method of hot wire anemometry and the method of pressure tappings were used as the main research method. A fleecy thread was used as a source of external disturbances. The measurements were performed in several modes. The thread was stretched in the test section of the wind tunnel in front of the model at a certain distance. Graphs of the distribution of static pressure and average velocity over the model surface were obtained. The results obtained showed a significant effect of the turbulent wake on the flow around the model.

#### **Keywords**

Laminar; turbulent; flow separation; separation control; pressure tappings method; flow visualization

**УДК 533.6**

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРА С ПЕРЕДНЕЙ ПОРИСТОЙ ВСТАВКОЙ ПОД УГЛОМ АТАКИ**

*Валиуллин Илья Римович<sup>1,2</sup>, студент; Миронов Сергей Григорьевич<sup>2</sup>, д.ф.-м.н., проф.*

<sup>1</sup> Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1 Тел. (383) 330-42-68  
e-mail [admin@itam.nsc.ru](mailto:admin@itam.nsc.ru)

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия,  
г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (913)005-48-19

*Валиуллин И.Р.*, e-mail [valiullin.ilya@gmail.com](mailto:valiullin.ilya@gmail.com)

*Адрес для корреспонденции: Валиуллин Илья Римович, Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (913)005-48-19*

#### **Аннотация**

В данном докладе предлагалось экспериментально изучить влияние обтекания цилиндра с передней газопроницаемой пористой вставкой на аэродинамические силы этой системы в сверхзвуковом потоке воздуха и получить данные о влиянии длины, диаметра пор передней вставки и угла атаки модели на коэффициенты сопротивления и подъемной силы.

#### **Ключевые слова**

Газопроницаемый пористый материал, сверхзвуковые потоки, аэродинамическое сопротивление, экспериментальное моделирование.

## 1. Введение

Важным моментом управления обтеканием с помощью газопроницаемых вставок является чувствительность метода управления к углу натекания потока на летательный аппарат, что и определило цель данной работы.

## 2. Методика экспериментального исследования

Эксперимент проводится на аэродинамической трубе Т-327А (Рис.2.)

Установлено коническое сопло критический диаметр, которого –20мм, а выходной диаметр – 220 мм.

Модель состоит из продольно обтекаемого цилиндра с плоским торцом, вдоль которого перемещалась тонкостенная трубка из газопроницаемого пористого материала, поддерживающая цилиндрическую вставку, и регулирующая длину ее выдвижения (Рис. 2).

Для определения аэродинамических характеристик моделей необходимо проводить весовые измерения.

Для этого были выбраны аэродинамические весы, в которых осуществлен тензометрический способ измерения нагрузок (Рис. 3).

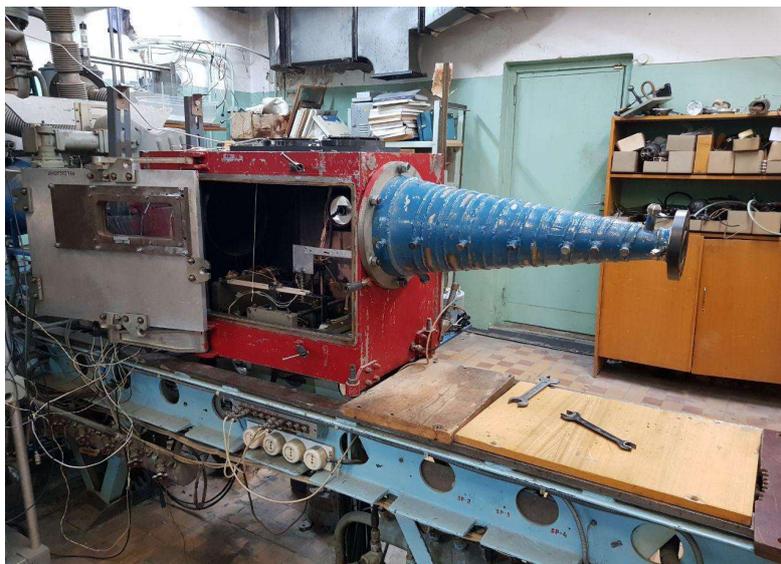


Рис. 1. Аэродинамическая труба Т-327А с рабочей камерой Эйфеля



Рис. 2. Модель: Цилиндр с передней газопроницаемой вставкой из вспененного никеля с полыми ячейками различного диаметра.



Рис. 3. Аэродинамические весы тензометрического типа.

### 3. Результаты

- Собрана и протарирована схема измерения числа Маха на выходе сопла.
- Выполнены измерения распределения числа Маха поперек выхода сопла и определена область примерного постоянства числа Маха используемая для весовых измерений.
- Протарированы тензометрические весы.
- Проведены измерения аэродинамических сил вдоль потока и поперек потока при разных длинах пористой вставки и углах атаки.

Измерения были выполнены для углов атаки  $\alpha = 0; 10^\circ$  и  $15^\circ$ . Ниже приведены результаты измерений коэффициента сопротивления  $C_x$  (а) и подъемной силы  $C_y$  (б) цилиндра без пористой вставки и цилиндра с передней пористой вставкой для различных углов атаки (Рис.4.). Рис. 4а показывает, что цилиндр с газопроницаемой передней пористой вставкой при всех исследованных углах атаки имеет меньший коэффициент аэродинамического сопротивления, чем цилиндр без пористой вставки. С другой стороны видно, что коэффициент подъемной силы цилиндра с пористой вставкой выше аналогичного коэффициента цилиндра без вставки (см Рис.4б).

а

б

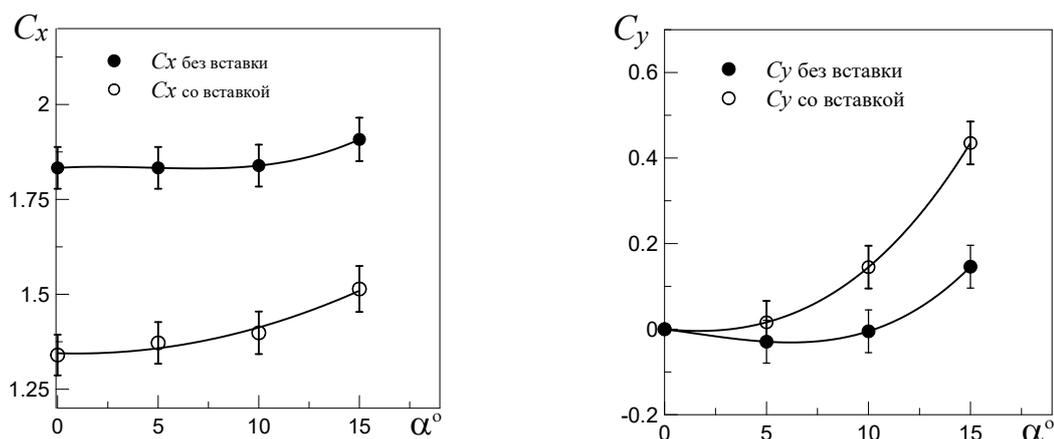


Рис. 4. Зависимости коэффициента сопротивления (а) и подъемной силы (б) от угла атаки модели для цилиндра без пористой вставки и цилиндра с пористой вставкой

## EXPERIMENTAL MODELING OF A SUPER SECONDARY CIRCULATION OF A CYLINDER WITH FRONT GAS-PERMEABLE INSERT AT AN ATTACK ANGLE

*Valiullin Ilya Rimovich*<sup>1,2</sup>, student;

*Mironov Sergey G.*<sup>1</sup>, Dr.Sc., prof.

1 Institute of Theoretical and Applied Mechanics. S.A. Khristianovich Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, ul. Institutskaya, 4/1 Tel. (383) 330-42-68 e-mail admin@itam.nsc.ru

2 Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20, tel. (913) 005-48-19

**Valiullin I.R.**, e-mail [valiullin.ilya@gmail.com](mailto:valiullin.ilya@gmail.com)

Address for correspondence: Valiullin Ilya Rimovich, Novosibirsk State Technical University, 6300 Karl Marx Ave., Novosibirsk, Russia, Tel. (913) 005-48-19.

### Annotation

The paper studies experimentally the influence of the front gas-permeable porous insert on the flow pattern and the aerodynamic characteristics of the cylinder in a supersonic air flow. The goal is to obtain data on the effect of the length, pore diameter of the porous insert and the angle of attack of the model on the drag and lift coefficients.

### Keywords

Supersonic flow around the cylinder, shock wave, gas-permeable insert.

## ИССЛЕДОВАНИЕ УЧАСТКА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ВЯЗКОПЛАСТИЧНОЙ ЖИДКОСТИ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ

*Гарбузов Дмитрий Николаевич*

НИ Томский государственный университет, 634057, Россия, г. Томск,  
пр. Ленина, д. 36, корп. 10

*Гарбузов Д.Н.*, e-mail: garbuzov98@ftf.tsu.ru

*Адрес для корреспонденции: Гарбузов Дмитрий Николаевич,*  
Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, 634057, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, корп. 10

### **Аннотация**

В работе рассматривается течение вязкопластичной жидкости в круглой трубе с заданным однородным профилем на входе. Сформулирована математическая постановка и разработан численный алгоритм решения, основанный на методе контрольного объема и корректирующей процедуры SIMPLE. Проведены параметрические исследования поставленной задачи. Показана зависимость размеров зоны стабилизации потока в зависимости от критерия подобия ( $Bn$ ).

### **Ключевые слова**

Участок стабилизации, вязкопластичная жидкость, стационарное течение, процедура SIMPLE, метод конечных объемов

### **Введение**

Течения вязкопластичных сред в трубопроводных системах встречаются в нанофлюидике, биомеханике, строительной и нефтегазовой отраслях. Характерной особенностью таких жидкостей является наличие предела текучести  $\tau_0$ . В областях потока с уровнем напряжений меньших  $\tau_0$ , называемых зонами квазитвердого движения, среда ведет себя как твердое тело. Численное моделирование сложных реологических сред остается сложной задачей и сегодня. Так в работе [1] показано, что длина развития является слабой, немонотонной функцией числа Бингама при малых значениях числа Рейнольдса ( $Re \leq 40$ ). Исследование длины зоны гидродинамической стабилизации для умеренных и малых значений  $Re$  представлено в работе [2].

### **Постановка задачи**

В работе проведено математическое моделирование стационарного ламинарного течения несжимаемой вязкопластичной жидкости в осесимметричной трубе конечной длины с целью исследования длины зоны гидродинамической стабилизации потока от определяющих параметров задачи. Основу математической постановки задачи составляет система уравнений

движения и неразрывности, записанных в безразмерном виде в цилиндрической системе координат:

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} = -\nabla p + \nabla \cdot (2\eta \mathbf{E}), \\ \nabla \cdot \mathbf{U} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Реологическое поведение среды описывается законом Шведова-Бингама, в соответствии с которым эффективная вязкость, определяется как:

$$\eta = \frac{Bn + A}{A}.$$

Здесь  $\mathbf{U}$  – вектор скорости с проекциями  $(U, V)$  на оси цилиндрической системы координат  $(r, z)$ ,  $p$  – давление,  $A = \sqrt{2e_{ij}e_{ji}}$  – интенсивность тензора скоростей деформаций  $\mathbf{E}$  с компонентами  $e_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_j}{\partial x_i} + \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \right)$ ,  $\operatorname{Re} = \frac{\rho U_0 R}{\mu}$  – число

Рейнольдса и  $Bn = \frac{\tau_0 R}{\mu U}$  – число Бингама,  $\rho$  – плотность жидкости,  $\mu$  – параметр реологического закона,  $\tau_0$  – предел текучести,  $R$  – радиус трубы. В качестве безразмерных масштабов длины, скорости и давления используется величины:

$R$ ,  $U_0$  – значение скорости во входном сечении и комплекс  $k \left( \frac{U_0}{R} \right)^n$ . Жидкость,

подаваемая в трубу, характеризуется однородным профилем скорости, что определяет граничное условие во входном сечении. На выходе выполняется мягкие граничные условия. На стенках трубы используется условие прилипания, на оси – условие симметрии.

Поставленная задача решается численно с использованием метода контрольных объёмов и корректирующей процедуры SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations). Выполнена регуляризация реологического закона для устранения сингулярности бесконечной вязкости [3]. Под регуляризацией понимается введение малого параметра таким образом, что среду можно рассматривать как жидкость с переменной вязкостью во всей области, при этом в «жидкой» зоне эффективная вязкость будет близка к вязкости в нерегуляризованном случае, а в зонах квазитвердого движения принимает большие, но конечные значения.

### Результаты

Получены характерные распределения скорости и давления, а также зон квазитвердого движения для течения вязкопластичной несжимаемой жидкости в осесимметричной трубе (рисунок 1). В области течения можно выделить два характерных участка: участок двумерного распределения кинематических характеристик в окрестности входа, где происходит перестроение заданного единичного профиля скорости в полностью развитый соответственно, и участок одномерного распределения в остальной части области течения. Рисунок 1(а) демонстрирует распределение поперечной составляющей вектора скорости.

Штриховкой отмечена зона квазитвердого движения. Распределение аксиальной составляющей представлено на рисунке 1(b). Как видно из данного рисунка, в области  $z > 1.25$ , скорость перестает изменяться в аксиальном направлении и все точки зоны квазитвердого течения имеют одинаковую скорость. Видно, что на входе в окрестности стенки образуется пик давления (рисунок 1 (с)).

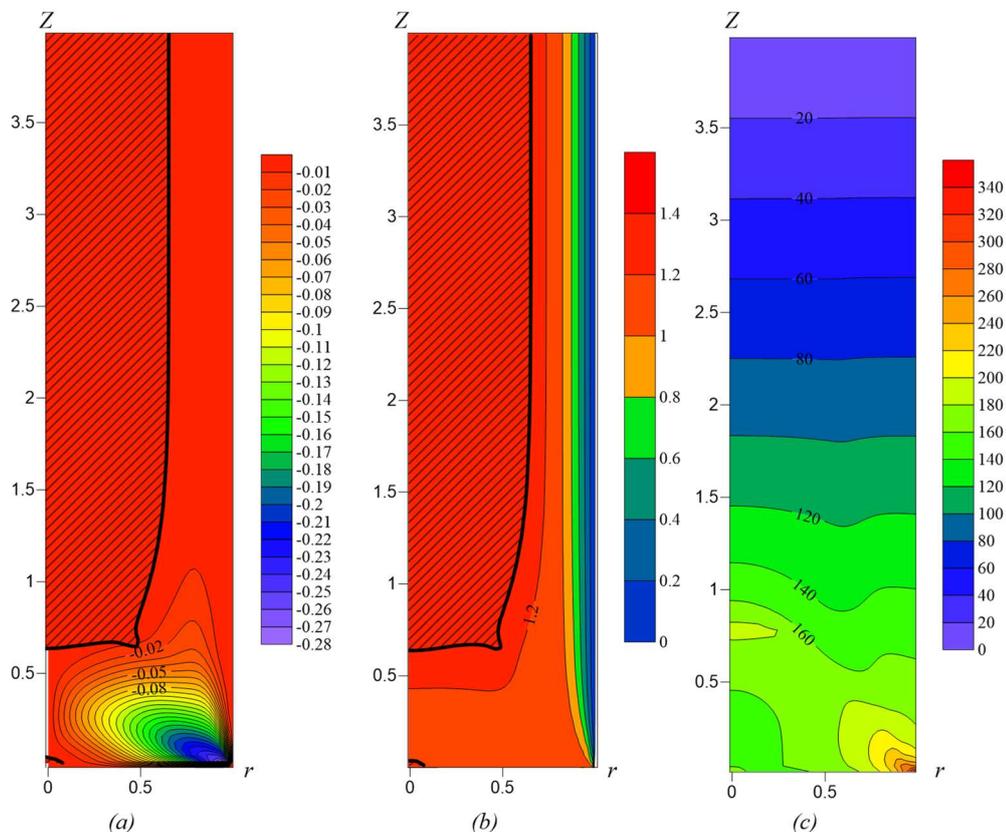


Рис. 1. Поля распределения  $U$  – (a),  $V$  – (b), структура потока – (c):  $Re=0.1$ ,  $Bn=15$

В таблице 1 представлено сравнение зависимости ширины ядра в области одномерного течения  $h_{числ}$  от коэффициента пропорциональности  $Bn$ , полученной численным методом, с  $h_{ан}$  аналогичным аналитическим решением. Наблюдается согласование с аналитическим решением задачи об одномерном установившемся течении в круглой трубе с заданным постоянным расходом.

Таблица 1

Сравнение полученной зависимости  $h(Bn)$  с аналитическим решением

$Bn$	$h_{числ}$	$h_{ан}$
1	0.1892571	0.187577
3	0.3778326	0.37754
5	0.475697	0.476827
6	0.5108682	0.5114
7	0.5392309	0.539866
10	0.597671	0.602216

В результате проведенных исследований установлена зависимость длин зоны гидродинамической стабилизации потока от критерия подобия ( $Bn$ ) при  $Re=0.1$  (рис.2).

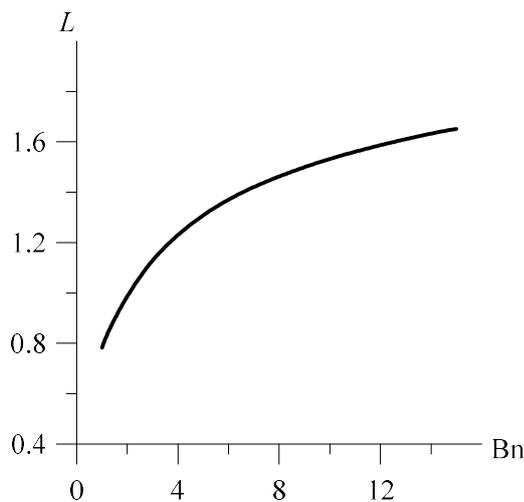


Рис. 2 – график зависимость  $L(Bn)$

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Poole R.J., Chhabra R.P. Development length requirements for fully developed laminar pipe flow of yield stress fluids // J. Fluids Eng. Trans. ASME. 2010. Vol. 132, № 3. P. 0345011–0345014.
2. Philippou M., Kountouriotis Z., Georgiou G.C. Viscoplastic flow development in tubes and channels with wall slip // J. Nonnewton. Fluid Mech. Elsevier B.V., 2016. Vol. 238. P. 44–56.
3. Papanastasiou T.C. Flows of Materials with Yield // J. Rheol. (N. Y. N. Y). 1987. Vol. 31, № 5. P. 385–404.

#### INVESTIGATION OF A SECTION OF HYDRODYNAMIC STABILIZATION OF A VISCOPLASTIC LIQUID IN A ROUND TUBE

*Garbuzov Dmitry Nicolaevich*

National research Tomsk State University, 634057, Russian Federation,  
Tomsk, Prospekt Lenina, 36, building 10.

*Garbuzov D. N.*, e-mail: garbuzov98@ftf.tsu.ru

*Address for correspondence: Garbuzov Dmitry Nicolaevich*, National research Tomsk State University, 634057, Russian Federation, Tomsk, 36, Prospekt Lenina, 36, building 10

#### Annotation

The paper considers the flow of a viscoplastic fluid in a round pipe with a given uniform profile at the inlet. A mathematical formulation is formulated and a numerical solution algorithm is developed based on the control volume method and the SIMPLE correction procedure. Parametric studies of the problem were

performed. The dependence of the size of the stabilization zone on the similarity criterion ( $Bn$ ) is shown.

### **Keywords**

Calming length, viscoplastic fluid, stationary flow, SIMPLE algorithm, control volume method.

**УДК 531.55**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ПРИ ВЫДУВЕ В ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ**

*Гимаева Наталья Радиковна, магистр*

Национальный исследовательский Томский государственный университет, 534050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д.36

*Гимаева Н. Р.*, email [natalia.gimaeva@inbox.ru](mailto:natalia.gimaeva@inbox.ru)

*Адрес для корреспонденции: Малышева Анастасия Олеговна,*  
Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
534050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д.36, тел. (961)888-39-75

### **Аннотация**

Летательные аппараты в форме конуса, а именно зонды, широко применяются в атмосфере Земли и других планет. Использование конусов объясняется высоким аэродинамическим качеством данных тел и умеренными тепловыми потоками к основной части их поверхности. Исследованию острых и затупленных конических тел как элементов конструкций сверхзвуковых летательных аппаратов до сих пор уделяется большое внимание. По сравнению с экспериментальным исследованием численное моделирование обтекания сложных составных тел характеризуется большим количеством данных о термодинамических параметрах обтекания. Статья направлена на изучение возможности снижения тепловых и аэродинамических нагрузок, действующих на тело в полете и определение эффективных способов управления движением в полете с применением выдува струи газа в пограничный слой. Представлено численное моделирование процесса локального выдува газа в пограничный слой на примере обтекания конуса.

### **Ключевые слова**

Аэродинамика, струйные органы управления, пограничный слой

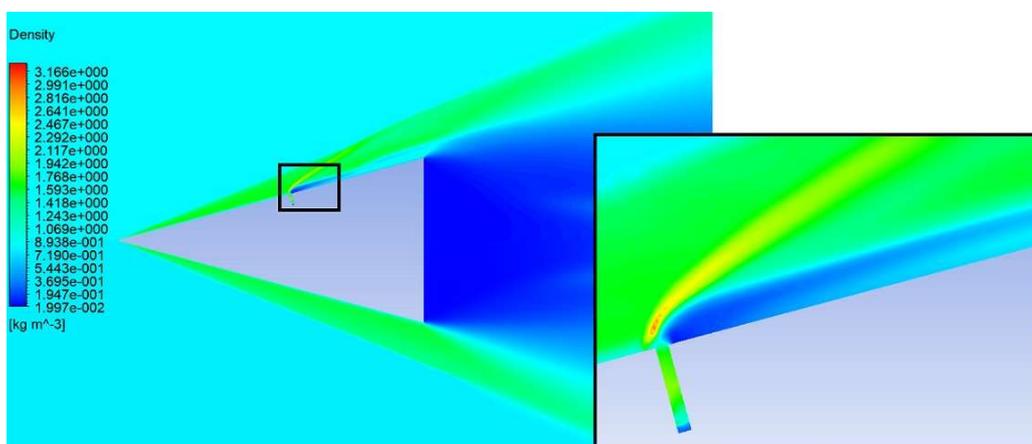
Практическое освоение космического пространства, начало которому было положено в нашей стране в конце пятидесятых – начале шестидесятых годов постоянно связано с поисками средств для снижения тепловых и аэродинамических нагрузок, действующих на летательный аппарат и

эффективных способов управления его полетом. В этой связи, были проведены первые исследования по взаимодействию газовых струй, вдуваемых с поверхности тела, с набегающими сверхзвуковыми потоками.

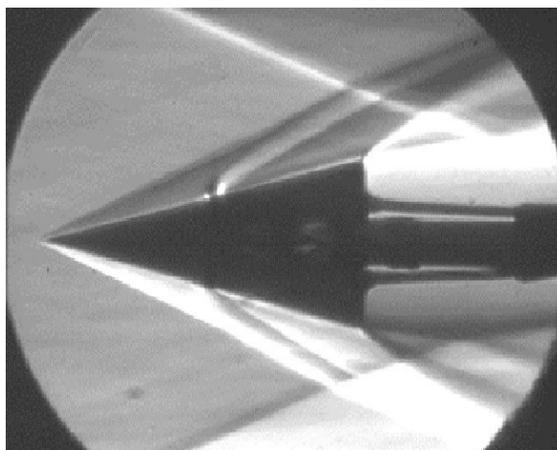
Целью настоящей работы является численное моделирование процесса локального выдува газа в пограничный слой. Математическое моделирование проводилось с использованием осесимметричной модели (конус). Угол полураствора моделей составлял  $15^\circ$ .

Численное моделирование процесса локального выдува струи газа в пограничный слой проведено с использованием пакета программ ANSYS Fluent. Моделирование течения осуществляется посредством решения трехмерной нестационарной системы уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу [1], с использованием SST модели турбулентности [2]. Выдув газа осуществляется через отверстие, расположенное на боковой поверхности конуса, рассматривается массовый расход выдуваемого газа.

Произведена качественная оценка экспериментальных данных, и данных, полученных с помощью численного расчета для случая обтекания конуса с отборным отверстием в диаметре 0.2 мм. Анализ экспериментальных и численных результатов показал их соответствие по основным особенностям структуры течения в рассматриваемых условиях: формирование конуса Маха, динамическое возмущение течения в области выдува, формирование отрывного течения с поверхности у основания конуса [3]. На рис. 1 приведены данные о поле плотности, полученные численно (рис. 1, а), и о структуре течения, полученные экспериментально (рис. 1, б) Приведенные данные соответствуют обтеканию конуса с выдувом при  $M = 3$ .



(а) распределение плотностей при численном моделировании



(б) экспериментальные данные

*Рис. 1.* Распределение плотностей и фотография обтекания конуса с выдувом через два симметрично расположенных отверстия сверхзвуковым воздушным потоком,  $M = 3$

В процессе работы отлажена методика численного расчета, позволяющая производить расчет параметров обтекания конического тела при заданной скорости набегающего потока и массового расхода выдуваемого газа. Сформированная база знаний открывает возможности производить численное моделирование тел более сложной формы для изучения их обтекания сверхзвуковыми и гиперзвуковыми потоками.

Грамотная состыковка эксперимента и математического моделирования позволяет получать достоверные данные для широкого диапазона аэродинамических и термогазодинамических параметров, а также дает информативную картину изменения параметров исследуемого процесса.

### Литература

1. *Wilcox D.C.* Turbulence Modeling for CFD. La Canada, California: DCW Industries Inc., 1998.
2. *Menter F.R.* Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications// AIAA Journal. 1994. Vol. 32, No 8.
3. *Фараонов В.В., Маслов Е.А., Чупашев А.В., Мацкевич В.В., Чижов С.Ю.* Экспериментальное исследование обтекания тел плоской и осесимметричной формы // *Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: сб. трудов IX всероссийской научной конференции, 21–25 сентября 2016 года, г. Томск.* Томск: Томский государственный университет, 2016. С. 144–145.

# NUMERICAL MODELING OF INJECTION INTO THE BOUNDARY LAYER TAKING INTO ACCOUNT THERMODYNAMICS AND CHANGES IN THE DIAMETER OF INJECTION DURING SUPERSONIC STREAM

**N.R Gimayeva**

National research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: natalia.gimayeva@inbox.ru

## **Abstract**

Cone-shaped aircraft, namely probes, are widely used in the atmosphere of the Earth and other planets. The usage of cones is explained by the high aerodynamic quality of these bodies and moderate heat fluxes to the main part of their surface. Researchers have paid great attention to the study of sharp and blunt conical bodies as structural elements of supersonic aircraft. Compared with the experimental study, numerical modeling of the flow around complex composite bodies is characterized by a large amount of data on the thermodynamic parameters of the flow. The article is aimed at studying the possibility of reducing the thermal and aerodynamic loads acting on the body in flight and determining effective methods of motion control in flight by blowing a gas jet into the boundary layer. We presented a numerical simulation of the process of local gas blowing into the boundary layer, as an example the case of the flow over a cone was selected.

## **Keywords**

Aerodynamics, control jet, boundary layer

**УДК 532.78**

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПОЛУКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ В СДВИГОВОМ ПОТОКЕ**

*Коляйн Юрий Мгерович*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36

*Коляйн Ю.М.*, e-mail: [yulanw@mail.ru](mailto:yulanw@mail.ru)

*Адрес для корреспонденции: Коляйн Юрий Мгерович,*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, тел. (913)100-17-59

## **Аннотация**

Проводится численное исследование процесса кристаллизации полукристаллических термопластичных полимеров в изотермических условиях в случае простого сдвига. Математическая модель кристаллизации основана на теории Колмогорова-Аврами. Написана и отлажена программа, позволяющая рассчитывать изменение степени кристаллизации с течением времени в

зависимости от условий процесса течения. Выполнены необходимые методические расчеты.

**Ключевые слова:** полукристаллические полимеры; сдвиговый поток; сферолиты; степень кристаллизации.

### Введение

Поведение полукристаллических термопластичных полимеров во время процесса переработки, а также характеристики конечного изделия определяются структурой материала, образованной при кристаллизации. Прогнозирование конечной микроструктуры очень важно для правильной организации технологических процессов. Исследование течений полимерных материалов с учетом упомянутых эффектов можно проводить с использованием метода математического моделирования. Для точного прогнозирования свойств детали методами компьютерного моделирования требуется реализация соответствующей модели кинетики кристаллизации, включая термические и механические эффекты развития структуры. Расплав полукристаллического полимера представляет собой суспензию сферолитов в полимерной жидкости. Сферолиты имеют шарообразную форму и состоят из упорядоченных и неупорядоченных цепей. При этом они начинают формироваться с небольших участков нанометрового размера – центров нуклеации, на которых в результате теплового или механического движения некоторые цепи или их сегменты перестраиваются параллельно. Столкновения зерен кристаллического вещества в процессе их роста, возникающих вокруг отдельных центров кристаллизации, создают дополнительные затруднения при моделировании. Эти столкновения нарушают правильную форму зерен, прекращая их рост в некоторых направлениях [1].

Целью данной работы является численное исследование процесса кристаллизации полукристаллических термопластичных полимерных материалов в изотермических условиях в случае простого сдвига.

### Метод экспериментального исследования

Математическая постановка задачи о сдвиговом течении в тонком зазоре формулируется на основе выводов теории кристаллизации Колмогорова-Аврами [2] в сочетании с модифицированным подходом Шнайдера [3] и содержит систему обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\varphi_{30}(t)}{dt} = N_0^*(t) = \frac{N_0}{\exp b} = \exp[a(T_m^0 - T(t))] \\ \frac{d\varphi_{20}(t)}{dt} = G^*(t)N_0^*(t) \\ \frac{d\varphi_{10}(t)}{dt} = G^*(t)\varphi_{20}(t) \\ \frac{d\varphi_{00}(t)}{dt} = G^*(t)\varphi_{10}(t) \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \frac{d\varphi_{3f}(t)}{dt} = N_f'^*(t) = |\dot{\gamma}(t)|^p \quad (\dot{\gamma}) = \frac{N_f'(t)}{A} \\ \frac{d\varphi_{2f}(t)}{dt} = G^* N_f^*(t) \\ \frac{d\varphi_{1f}(t)}{dt} = G^* \varphi_{2f}(t) \\ \frac{d\varphi_{0f}(t)}{dt} = G^* \varphi_{1f}(t) \end{array} \right.$$

$$G^*(t) = \frac{G(t)}{G_0} = \exp\left(-\frac{U^*}{R(T-T_\infty)}\right) \exp\left(-\frac{K_g}{T(T_m^0 - T)}\right),$$

$$\alpha = 1 - \exp\left[-8\pi(C_0\varphi_{00} + C_f\varphi_{0f})\right]$$

где  $G^*(t)$  – скорость роста сферолита,  $\alpha$  – степень кристаллизации,  $\varphi_3(t)$  ( $\varphi_3(t)=8\pi N$ ) – число, пропорциональное количеству сферолитов,  $\varphi_2(t)$  ( $\varphi_2(t)=8\pi R$ ) – число, пропорциональное сумме радиусов сферолитов,  $\varphi_1(t)$  ( $\varphi_1(t)=S_{nos}$ ) – площадь поверхности сферолита,  $\varphi_0(t)$  ( $\varphi_0(t)=V$ ) – общий объем сферолита,  $N_0^*(t)$  – число ядер, индуцированное тепловым состоянием,  $N_f^*(t)$  – число ядер, индуцированное потоком,  $T_m^0$  – равновесная температура плавления,  $U^*$  – энергия активации,  $T_\infty = T_g - 243\text{K}$  – температура, ниже которой движение молекул становится невозможным,  $T_g$  – температура стеклования,  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвига,  $C_0 = G_0^3 \exp b$ ,  $C_f = G_0^3 A$ . При этом предполагается, что значения  $\varphi$  получены в случае неограниченного роста сферолитов без учета столкновений друг с другом.

Согласно литературным данным, поток сильно влияет на количество активированных ядер. Это число зависит от явлений, имеющих два разных источника: поток и тепловое состояние материала. Чтобы различать эти два эффекта, общее количество ядер выражается как сумма числа ядер индуцированных тепловым состоянием и числа ядер индуцированных потоком. Таким образом, общее количество ядер можно представить в следующем виде:  $N(t) = N_0(t) + N_f(t)$ .

Системы уравнений дополняются начальными условиями. Предполагается, что в момент времени  $t = 0$ , отсутствуют какие-либо центры кристаллизации, а степень кристаллизации равна нулю. Физические константы взяты из работы [4] и соответствуют полипропилену.

Численное решение задачи получено с использованием метода Рунге-Кутты. Написана и отлажена программа. Выполнены методические расчеты проверки аппроксимационной сходимости, результаты которых представлены в таблице 1.

Таблица 1

Аппроксимационная сходимость

Шаг	h = 0.1	h = 0.05	h = 0.025	h = 0.0125
$\alpha$	0.177149	0.176909	0.176789	0.176729

## Результаты и обсуждение

Проведены параметрические исследования процесса кристаллизации для сдвигового течения полимера в тонком зазоре в изотермических условиях, а также в случае охлаждения с заданным темпом. Из рис. 1а видно, что в начальный момент времени происходит зарождение ядер и первоначальное формирование сферолитов. Затем происходит рост, и в определенный момент времени, при данной температуре, наступает насыщение. Это означает, что

концентрация сферолитов достигла своего предела. По мере роста температуры, происходит сдвиг в сторону увеличения времени кристаллизации.

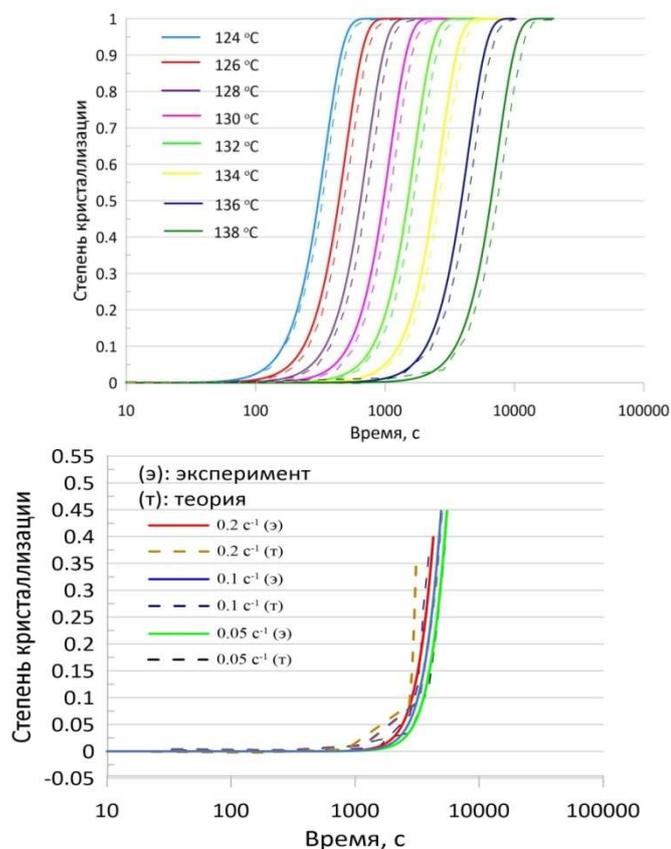


Рис.1. График зависимости степени кристаллизации от времени: *а* – в состоянии покоя при различных температурах, *б* – в случае простого сдвига

На рис.1*б* изображена зависимость степени кристаллизации от времени в случае, когда скорость сдвига отлична от нуля. Вычисления проводились с различными значениями скорости сдвига. Из графика видно, что скорость образования центров кристаллизации увеличивается, поскольку действие потока интенсифицирует процесс зарождения сферолитов.

### Выводы

- проведено численное исследование процесса кристаллизации полукристаллических термопластичных полимерных материалов в изотермических условиях в случае простого сдвига;
- написана и отлажена программа;
- получены зависимости степени кристаллизации от времени в состоянии покоя и в случае простого сдвига с заданным темпом.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колмогоров А.Н. К статистической теории кристаллизации металлов, Изв. АН СССР. Сер.матем. 1937. – Т. 1, № 3. – С. 355 – 359

2. Zheng R., Kennedy P. Flow Analysis of Injection Molds 2<sup>nd</sup> Edition / Hanser publications, 2013. – 380 pp.
3. Schneider W., Koppl A., Berger J. Non-isothermal crystallization of polymers // Int. Polym. Process, 2. 1988, pp. 151 – 154.
4. Boutaous M., Bourgin P., Zinet M. Thermally and flow induced crystallization of polymers at low shear rate // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 165. pp. 227 – 237.

## NUMERICAL MODELING OF CRYSTALLIZATION OF SEMI-CRYSTALLINE POLYMERS AT SHEAR FLOW

*Kolayan Yuriy Mgerovich – Bachelor's student, e-mail: [yulanw@mail.ru](mailto:yulanw@mail.ru)*

National Research Tomsk State University, 634050,  
Lenin Avenue 36, Tomsk, Russia

### **Annotation**

In this work crystallization of semi-crystalline thermoplastic polymers under isothermal conditions in the case of simple shear is studied. Mathematical model based on Kolmogorov-Avrami theory. To calculate the relative crystallinity changes over time depend upon conditions of flow the program was written and debugged. The necessary methodological calculations were made.

### **Keywords**

Semi-crystalline polymers; shear flow; spherulites; relative crystallinity.

УДК 623.522.2

## ПОЛУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ВДОЛЬ СТЕНКИ КАНАЛА ПРИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ

*Коляян Юрий Мгерович, Кененбаева Диана Куаткызы, Козюкова Валерия  
Владимировна, Большаков Никита Алексеевич, Тыртышный Сергей  
Александрович, Гаркаев Максим Вячеславович*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36

*Коляян Ю.М., e-mail [yulanw@mail.ru](mailto:yulanw@mail.ru)*

*Адрес для корреспонденции: Коляян Юрий Мгерович,*

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, тел. (913) 100-17-59

## **Аннотация**

В работе предложен способ получения распределения давлений на стенке канала проточного тракта модели прямого воздушно-реактивного двигателя. Спроектирован и изготовлен зонд, позволяющий осуществлять измерение величины статического давления в проточном тракте ПВРД. Проведена предварительная тарировка используемых датчиков давления. Для получения градуировочных зависимостей составлена программа на языке C++. С использованием изготовленного зонда проведены дренажные испытания при обтекании модели ПВРД потоком воздуха с числом Маха  $M = 6$ . Проведена модернизация стенда, позволившая проводить градуировку пяти датчиков вместо трех.

## **Ключевые слова**

Дренажные испытания; прямооточный воздушно-реактивный двигатель; сверхзвуковой поток; датчики давления.

С каждым годом увеличивается разнообразие экспериментальных исследований в аэродинамических трубах, и к их использованию прибегают не только авиастроители. Строители метро хотят знать сопротивление, оказываемое воздухом при движении поезда в тоннеле, степень вентиляции вагонов; инженеры, занимающиеся автомобилестроением, уделяют особое внимание аэродинамическим свойствам моделей, влияющим на топливную экономичность и курсовую устойчивость.

Растет интерес к исследованию обтекания и определению аэродинамических характеристик тел различной формы, а результаты экспериментальных исследований используются для проверки физических и математических моделей, применяемых для расчёта сложных внешних и внутренних течений.

Целью данной работы является экспериментальное получение распределения давлений в канале проточного тракта осесимметричной модели прямооточного воздушно-реактивного двигателя.

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе кратковременного действия – модельной аэродинамической установке [1]. Исследуемая модель – прямооточный воздушно-реактивный двигатель [2] – размещалась в рабочей части, после чего производилось ее обтекание равномерным сверхзвуковым потоком. Для пуска установки основной клапан включался с пульта управления и рабочий газ из баллонов поступал в электрический нагреватель, затем в форкамеру и соответствующее осесимметричное сопло [3].

Для измерения давления в осесимметричном канале был спроектирован и изготовлен зонд (рис.1а). Статическое давление измерялось в восьми точках на стенке проточного тракта модели ПВРД: дренажные отверстия соединялись трубками с тензодатчиками типа ТДМ2-А.

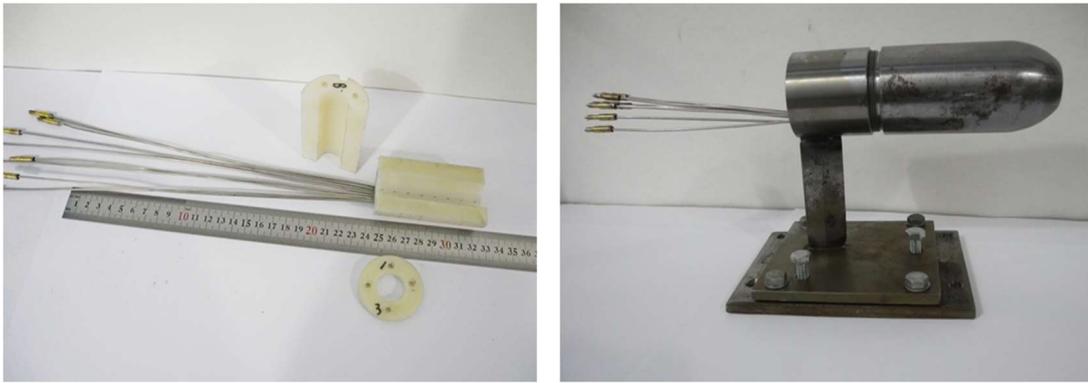


Рис.1.Зонд для дренажных испытаний: *а* – внешний вид конструкции, *б* – модель ПВРД с зондом, размещенным в проточной части

Была проведена градуировка датчиков – осуществлялось их нагружение давлением известной величины и регистрировались отклики каждого из восьми датчиков. Для автоматизации обработки зарегистрированных значений написана программа на языке C++, позволяющая получить коэффициенты для градуировочных зависимостей методом наименьших квадратов. Полученные зависимости были использованы для пересчета экспериментально зарегистрированных сигналов.

Проведена серия экспериментов с использованием разработанного зонда для дренажных испытаний. Зонд размещался в проточной части осесимметричной модели ПВРД (рис.1б) [2], затем производилось обтекание модели равномерным сверхзвуковым потоком со скоростью, соответствующей числу Маха  $M = 6$ . Были зарегистрированы сигналы с каждого датчика и получены распределения давления вдоль стенки проточного тракта ПВРД. В настоящее время планируется проведение серии аналогичных экспериментов для случаев обтекания модели потоками с числами Маха  $M = 5$  и  $M = 7$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Звезинцев В.И. Газодинамические установки кратковременного действия. Часть I. Установки для научных исследований. – Новосибирск: Параллель, 2014. – 551с.
2. Савкина Н. В., Фарапонов В. В., Маслов Е. А. Экспериментально-теоретическое исследование газодинамики в проточной части модельного гпврд при обтекании сверхзвуковым потоком //Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики-2017. – 2018. – С. 35-45.
3. Скибина Н. П., Савкина, Н. В., Фарапонов В. В., Маслов Е. А. Комплексный подход к решению задачи высокоскоростного обтекания тела в импульсной аэродинамической установке и проверка согласованности полученных результатов //Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2019. – №. 59. С. 118-129. DOI: 10.17223/19988621/59/12

## OBTAINING STATIC PRESSURE DISTRIBUTION ALLONG THE CHANNEL WALL AT AERODYNAMIC TESTS

*Kolayan Yuriy Mgerovich, Kenenbayeva Diana Kuatkyzy, Kozjukova Valeriya Vladimirovna, Bol'shakov Nikita Alekseevich,*

*Tyrtyshtnyy Sergey Aleksandrovich, Garkaev Maxim Vyacheslavovich*

National Research Tomsk State University, 634050,

Lenin Avenue 36, Tomsk, Russia

*Address for correspondence: Kolayan Yuriy Mgerovich,*

National Research Tomsk State University, 634050,

Lenin Avenue 36, Tomsk, Russia, ph. (913) 100-17-59

### Abstract

In this paper a method for obtaining a pressure distribution on the wall on working duct of ramjet engine is described. The device for measuring static pressure inside a duct of a ramjet engine designed and constructed. Preliminary tests for the static pressure sensors were carried out. A program for acquiring calibration curves is compiled, using the C++ language. The experimental study for supersonic flow of air around ramjet engine model with Mach number  $M = 6$  using the constructed device for drainage measurements is successfully completed.

### Keywords

Drainage tests, ramjet engine, supersonic flow, pressure sensors

УДК 544.452

## ГОРЕНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО-ПЕРЕМЕШАННОЙ МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В КОАКСИАЛЬНОМ РЕАКТОРЕ ВСТРЕЧНОГО НАПРАВЛЕНИЯ

*Косяков Виктор Андреевич<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

<sup>2</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. Христиановича СО РАН, 630000, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

*Косяков В.А., e-mail [asenya777@yandex.ru](mailto:asenya777@yandex.ru)*

*Адрес для корреспонденции: Косяков В.А., Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. +7(993)025-20-39*

### **Аннотация**

В данной работе исследуется горение предварительно перемешанных метана-воздушных смесей в коаксиальном противоточном реакторе. Установлено, что в зависимости от начальных параметров могут быть реализованы различные режимы горения, характеризующиеся количеством, формой и взаимным расположением фронтов пламени.

### **Ключевые слова**

Горение бедных смесей, предварительно-перемешанное пламя, противоточный реактор, CFD.

Экологические проблемы выходят на первый план в современном обществе, стимулируя развитие экологически чистых технологий. Таким образом, фундаментальные исследования режимов и пределов горения бедных смесей топлива в перспективных системах имеют большое значение.

В данной работе исследуется горение предварительно перемешанных метана-воздушных смесей в коаксиальном противоточном реакторе. Реактор состоит из внутренней и внешней трубок, вставленных друг в друга, как показано на рисунке 1. Во внешнюю трубу подают бедную метана-воздушную смесь с коэффициентом избытка топлива  $\varphi_{out}$  от 0,4 до 0,8. Во внутреннюю трубку подается либо чистый метан ( $\varphi_{in} = \infty$ ), либо богатая метана-воздушная смесь с  $\varphi_{in} = 1,5, 2,5$  и  $3,5$ . Численное моделирование проводилось с помощью программного пакета OpenFOAM. В ходе численного моделирования варьировались расходы смеси и соотношения стехиометрии во внутренней и внешней трубках.

Установлено, что в зависимости от начальных параметров могут быть реализованы различные режимы горения, характеризующиеся количеством, формой и взаимным расположением фронтов пламени. В случае потока чистого метана во внутренней трубе наблюдается двухслойная структура пламени. В этом случае, показанном на рисунке 1, бедное пламя чашеобразного предварительно смешанного пламени и небольшое диффузионное пламя около выхода из внутренней трубки стабилизируются. Результаты численного моделирования позволили сделать вывод, что высокотемпературные зоны, возникающие в результате диффузионного горения, играют стабилизирующую роль для чашеобразного пламени и вызывают расширение пределов горения. В случае подачи богатой метана-воздушной смеси во внутреннюю трубку наблюдается трехслойная структура пламени, состоящая из бедного пламени предварительно перемешанной смеси, диффузионного пламени и богатого пламени предварительной смеси. Обсуждается влияние степени эквивалентности смесей и расходов на структуру и форму пламени. Результаты численного моделирования сравниваются с экспериментальными данными. Пример такого сравнения показан на рис. 1. Показано, что примененная упрощенная модель позволяет воспроизвести основные особенности горения в

исследуемой системе и дает четкую физическую интерпретацию экспериментальных результатов.

Работа выполнена под руководством доктора физико-математических наук Фурсенко Р.В.

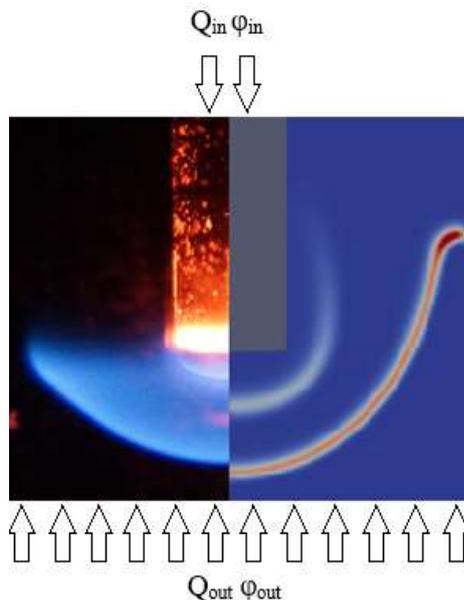


Рис. 1. Экспериментальный и численный результаты тепловыделения, демонстрирующие чашеобразное пламя и диффузионное пламя, характерное для двухслойной структуры пламени. ( $Q_{in}=0.005$  l/min,  $\varphi_{in}=\infty$ ,  $Q_{out}=5.9$  l/min,  $\varphi_{out}=0.7$ )

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kee R. J., Coltrin M. E., and Glarborg P. Chemically reacting flow: theory and practice. Hoboken, NJ: Wiley Interscience, 2003.
2. World energy outlook. Paris, 2010.
3. Ellzey J. L., Belmont E. L., Smith C. H., Heat recirculating reactors: Fundamental research and applications, Progress in Energy and Combustion Science 72 (2019) 32–58.
4. Weinberg F. J., Combustion in heat-recirculating burners, Advanced combustion methods, (1986) 183–236.

## COMBUSTION OF A PRE-MIXED METHANE-AIR MIXTURE IN A CO-AXIAL COUNTER FLOW REACTOR

**Kosyakov Viktor Andreevich**

Novosibirsk State Technical University

630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20

630073, Russia, Novosibirsk, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, st. Institutskaya, 4/1

**Kosyakov V.A.**, email [asenya777@yandex.ru](mailto:asenya777@yandex.ru)

*Address for correspondence: Kosyakov V.A.,* Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20, tel. (993) 025-20-39

### **Annotation**

In this work, the combustion of premixed methane-air mixtures in co-axial counter flow reactor is studied. It was found that depends on problem parameters various combustion regimes characterized by the number, shape and relative position of the flame fronts can be realized.

### **Keywords**

Fuel-lean mixtures combustion, premixed flames, diffusion flame, counterflow reactor, CFD.

**УДК 532.526.3**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА ЗА ПРЯМЫМ СКАЧКОМ УПЛОТНЕНИЯ В УДАРНОЙ ТРУБЕ ПРЯМОТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ**

*Маслобоев Илья Андреевич<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет, 630073,  
Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

<sup>2</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. Христиановича СО  
РАН, 630000, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

*Маслобоев И.А.*, e-mail [hawke90@yandex.ru](mailto:hawke90@yandex.ru)

*Адрес для корреспонденции: Маслобоев И.А.*, Новосибирский  
государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр.  
Карла Маркса, 20, тел. +7(914)448-69-61

### **Аннотация**

В работе представлены результаты экспериментальных исследований применимости прямоотеневого метода визуализации для определения положения ламинарно-турбулентного перехода за прямым скачком уплотнения на импульсном экспериментальном стенде. Получены результаты, отображающие зависимость развития толщины пограничного слоя от времени течения потока.

### **Ключевые слова**

Пограничный слой, ламинарно-турбулентный переход, ударная труба, оптический прямоотеневой метод.

Развитие технологий, связанных с полетами на высоких скоростях, привели к новым исследованиям в области пограничного слоя, а именно ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП). Одной из задач данных

исследований является определение зоны ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое на аэродинамических поверхностях аппарата.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований применимости протеневого метода визуализации для определения положения ламинарно-турбулентного перехода за прямым скачком уплотнения на импульсном экспериментальном стенде. Для проведения экспериментов по исследованию ПС и определению ЛТП была предоставлена ударная газодинамическая установка лаборатории № 4 ИТПМ СО РАН. Ударная труба состоит из камеры высокого давления, куда нагнетается толкающий газ, диафрагмы и канала низкого давления.

В качестве толкающего газа используется воздух при высоком давлении, в качестве рабочего газа используется также воздух, но при низком давлении. В момент разрыва диафрагмы происходит образование УВ и ударное сжатие рабочего газа за фронтом УВ. В движущемся газе образуется пограничный слой, вызванный вязким трением газа о поверхность стенок канала.

После проведения серии экспериментов и обработки их с помощью программного алгоритма были получены результаты, отображающие зависимость развития толщины пограничного слоя от времени течения потока (рис. 1).

Работа выполнена под руководством доктора физико-математических наук Фомичева В.П.

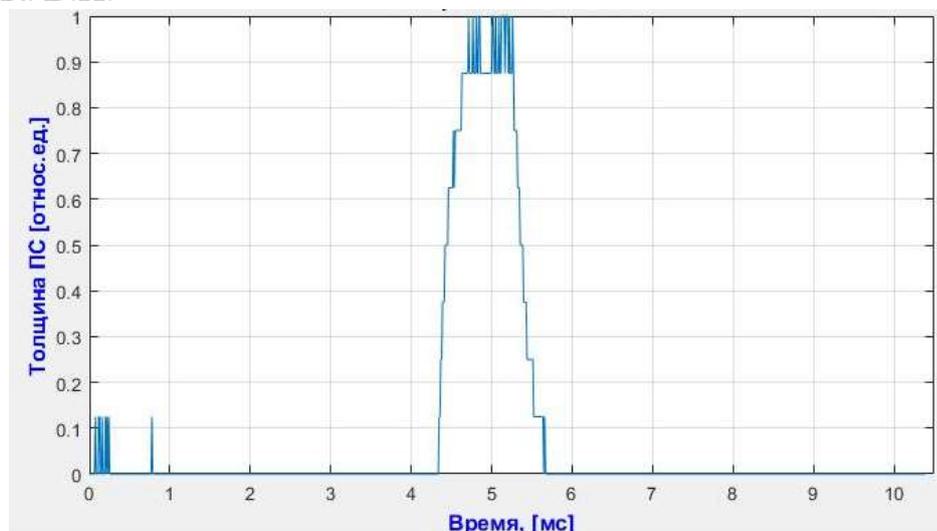


Рис. 1. Экспериментальный результат тенеобразования. ( $P_2=100$  торр,  $M_2=1,34$ )

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

5. Новгородов М. А., Поляков Ю. А., Тищенко В. А., Хандуров Н. В., Чекалин Э. К. Экспериментальное исследование характера пограничного слоя в ударной трубе и его влияние на протекание электрического тока в плазме // ЖТФ. – 1978. – Т. 48, Вып. 6. – С. 1186-1190.

6. Martin W. A. An Experimental Study of the Turbulent Boundary Layer Behind the Initial Shock Wave in a Shock Tube // Journal of the Aerospace Sciences. – 1958. – Vol. 35, № 10. – P. 644-652.
7. Знаменская И. А., Латфуллин Д. Ф., Луцкий А.Е., Мурсенкова И. В. Ламинарно-турбулентный переход в сверхзвуковом пограничном слое при иницировании импульсного поверхностного разряда // ЖТФ. – 2008, – Т. 34, Вып. 15. – С. 75-80.
8. Брутян М., Петров А., Потапчик А. Новый метод оптических исследований состояния пограничного слоя в аэродинамическом эксперименте // Ученые записки ЦАГИ. –2015. –т.46. – Вып. 6.

## **RESEARCH OF THE GAS FLOW BEHIND A DIRECT SHOCK WAVE IN A SHOCK TUBE IN THE BOUNDARY LAYER**

**Masloboev Ilya Andreevich**

Novosibirsk State Technical University

630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20

630073, Russia, Novosibirsk, Khristianovich Institute of Theoretical and  
Applied Mechanics SB RAS, st. Institutskaya, 4/1

**Masloboev I.A.**, email hawkeye90@yandex.ru

*Address for correspondence:* **Masloboev I.A.**, Novosibirsk State Technical  
University, 630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20, tel. (914) 448-69-61

### **Annotation**

The development of technologies associated with flights at high speeds has led to new research in the field of the boundary layer, namely the laminar-turbulent transition (LTP). One of the tasks of these studies is to determine the zone of the laminar-turbulent transition in the boundary layer on the aerodynamic surfaces of the vehicle. This paper presents the results of experimental studies of the applicability of the direct shadow visualization method for determining the position of a laminar-turbulent transition behind a direct shock wave on a pulsed experimental stand.

### **Keywords**

Boundary layer, laminar-turbulent transition, shock tube, optical direct shadow method.

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДУШНЫХ СТРУЙ НА  
ПОВЕРХНОСТИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА КОТЕЛЬНОГО  
АГРЕГАТА**

*Меньшиков Кирилл Сергеевич<sup>1</sup>, д.т.н Звегинцев Валерий Иванович<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Институт Теоретической и Прикладной механики им. С.А.

Христиановича СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская 4/1

*Меньшиков К.С.*, e-mail: [kirill.menshikov.1997@mail.ru](mailto:kirill.menshikov.1997@mail.ru)

*Звегинцев В.И.*, e-mail: [zvegin@itam.nsc.ru](mailto:zvegin@itam.nsc.ru)

**Аннотация**

В данной работе проведено экспериментальное исследование воздействия импульсных воздушных струй на поверхности конвективного теплообмена котельного агрегата. Был изготовлен специальный экспериментальный стенд. Установка включает в себя пневмоимпульсный генератор ПГ-25/8 и поперечно расположенные потоку трубы с постоянным шагом. Проведены измерения давления в нестационарном воздушном потоке. Получены графики зависимости нагрузки по времени на каждую трубу.

**Ключевые слова**

Импульсные струи, сверхзвуковая скорость, пневмоимпульсный генератор.

**Введение**

Генеральное направление энергетической и энергопотребляющих отраслей промышленности состоит в повышении эффективности работы энергетических установок. Важным резервом повышения эффективности тепловых энергетических установок является устранение загрязнения теплообменных поверхностей золовыми отложениями, содержащимися в дымовых газах (проблема шлакования).

Появление золовых отложений вызывает серьезные ограничения в обеспечении длительных максимальных нагрузок работы энергетических агрегатов. Регулярное включение систем очистки позволяет поддерживать поверхности нагрева в конвективной шахте котла в эксплуатационно-чистом состоянии, в результате чего улучшается теплообмен между уходящими газами и поверхностями нагрева и, следовательно, снижается температура уходящих газов.

Известны различные способы борьбы с проблемой шлакования. Длительное время основными способами очистки поверхностей были газоимпульсная очистка, паровая обдувка и дробеочистка. Однако эксплуатация паровых и водогрейных котлов, котлов-утилизаторов, нагревательных печей, показала недостаточную эффективность и надежность традиционных средств очистки [1].

В основу пневмоимпульсных систем очистки заложено ударно-волновое воздействие мощных импульсных струй воздуха на золотые отложения. Воздействие осуществляется с помощью специальных пневмогенераторов (ПГ), который заполняется воздухом, а затем выбрасывает этот воздух за доли секунды, что позволяет увеличить секундный расход в сотни раз и организовать мощное импульсное воздействие на обрабатываемые поверхности [2].

Эффективность в использовании такого способа очистки поверхности нагрева подтверждается отчетом о работе комплекса обдувочных аппаратов (пневмогенератор ПГ-25/8) в рабочем диапазоне нагрузок.

Таким образом, цель работы заключается в определении сил, действующих на трубы конвективных поверхностей охлаждения больших котельных агрегатов при воздействии на них импульсных воздушных струй от системы очистки.

### Описание установки

Экспериментальное исследование производилось при помощи специального стенда (рис. 1). Он включает в себя пневмоимпульсный генератор ПГ-25/8 и поперечно расположенные потоку трубы с постоянным шагом. Диаметр выходного сопла равен 120 мм. Шаг между трубами составляет 75 мм. Тензодатчики располагаются на трубах в плоскости набегающего потока для определения воздействия нагрузки. Установлены 2 датчика давления как показано на рисунке 1. Показания снимаются с помощью АЦП. Для более точного результата необходима повторяемость эксперимента.

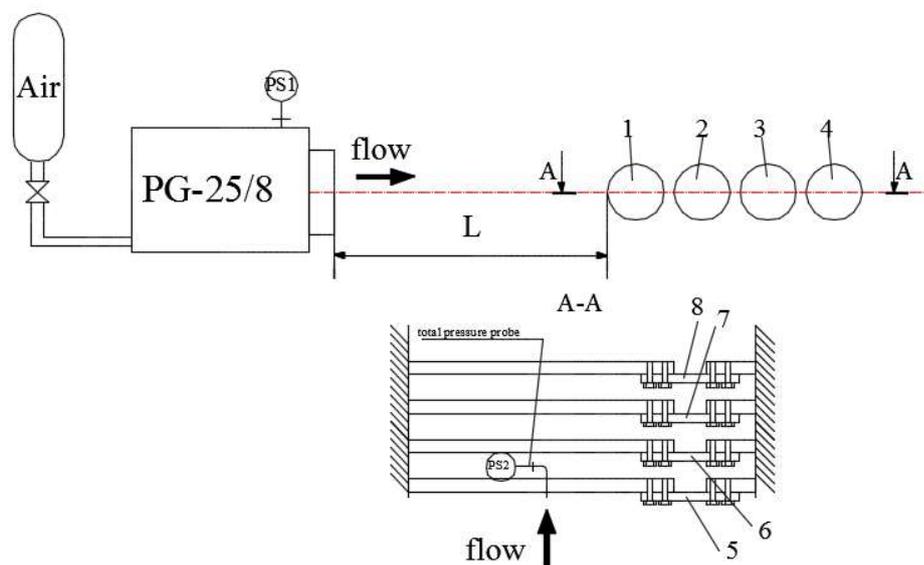


Рис. 1. Схема установки: 1- первая труба, 2 - вторая труба, 3 – третья труба, 4 – четвертая труба, 5-8 – тензодатчики.

### Результаты экспериментов

В экспериментах пневмоимпульсный генератор заполняется воздухом до необходимого значения давления. Рисунок 2 показывает, как изменяется

давление в форкамере ПГ-25/8 (PS1) и нестационарной воздушной струе (PS2). Сжатый воздух истекающий из выхлопного сопла превышает скорость звука.

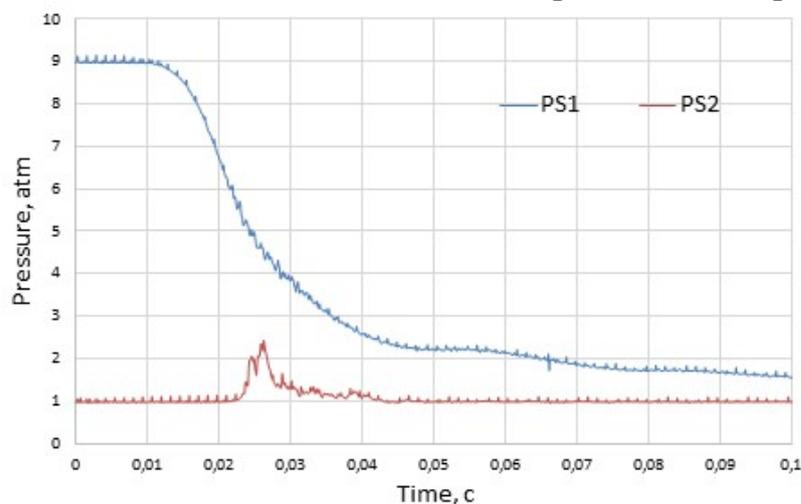


Рис. 2. Изменение давления во время эксперимента при P = 9 атм и L = 1.5 метра

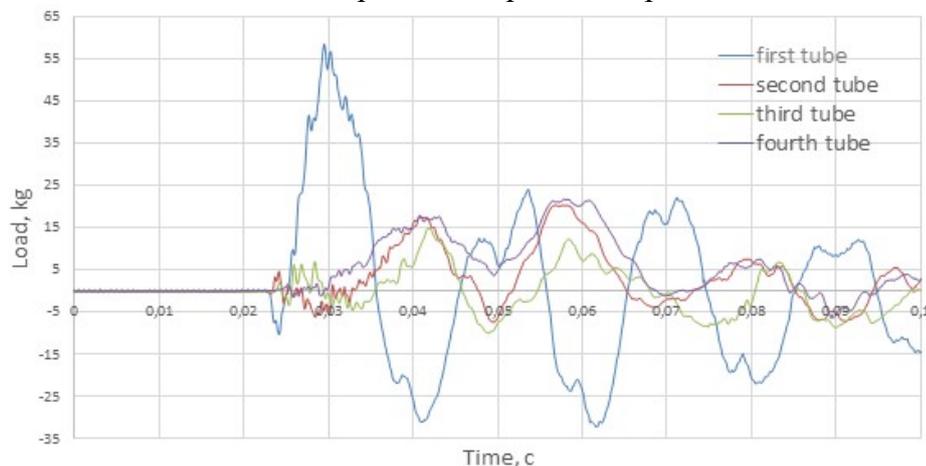


Рис. 3. Зависимость нагрузки по времени при P = 9 атм и L = 1.5 метра

Показания, полученные тензодатчиками, имеют затухающий колебательный характер. Важно отметить, что нагрузка имеет положительные и отрицательные значения. Во всех проводимых экспериментах основная нагрузка приходится на первую трубу. В таблице представлены осредненные результаты нескольких пусков.

Таблица

**Максимальная нагрузка (кг).**

Опыт	Начальные условия	Труба № 1	Труба № 2	Труба № 3	Труба № 4
№ 1	P = 7 атм, L = 1 м	48,01	22,16	18,63	19,71
№ 2	P = 7 атм, L = 1.5 м	21,53	10,49	8,18	11,92
№ 3	P = 9 атм, L = 1 м	82,05	38,74	30,79	28,23
№ 4	P = 9 атм, L = 1.5 м	54,05	20,05	14,85	20,69

Далее продемонстрированы результаты давления в нестационарной воздушной струе при нескольких различных начальных условиях (рис. 4). Максимальное давление в (а) составляет  $P = 3,36$  атм, в (b) составляет  $P = 2,43$  атм, в (с) составляет  $P = 2,05$  атм.

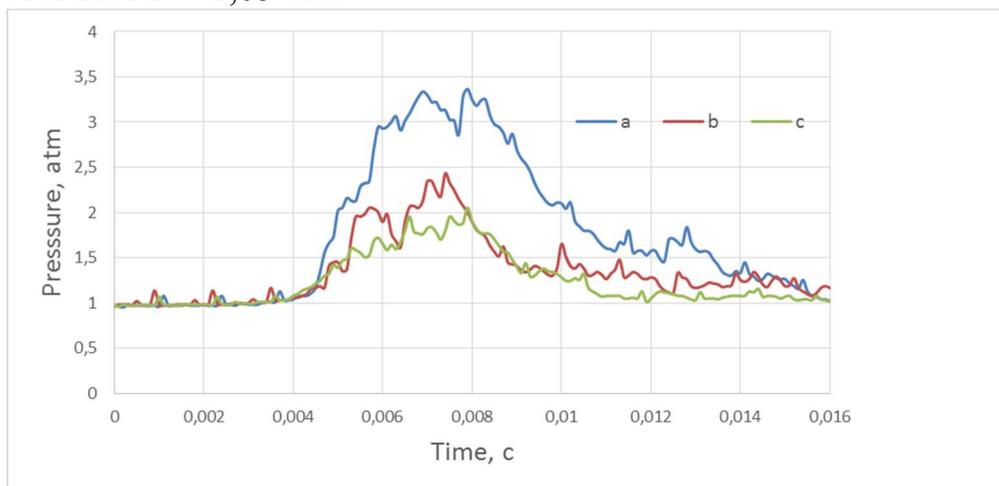


Рис. 4. Изменение давления (а) при  $P = 9$  атм и  $L = 1$  м, (b) при  $P = 9$  атм и  $L = 1,5$  м, (с) при  $P = 7$  атм и  $L = 1$  м.

## Выводы

Экспериментально определены силы, действующие на трубы конвективных поверхностей охлаждения больших котельных агрегатов при воздействии на них импульсных воздушных струй от системы очистки.

Направлением дальнейшего исследования является получение сходимости эксперимента с численным моделированием, а также проведение экспериментов при других конфигурациях расположения и количества труб в потоке.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пугач Л.И. Шлакование котельных агрегатов и способы борьбы с ним / Ч. III Пассивные способы борьбы со шлакованием. Новосибирск, Сибтехэнерго. Технический отчет, №4136, 1976.
2. Звегинцев В.И. Газодинамические установки кратковременного действия. В двух частях. Часть 2. Установки для промышленных приложений. – Новосибирск: Параллель, 2015. – 339 с.

## IMPACT OF PULSED AIR JETS ON THE SURFACE OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER OF A BOILER UNIT

*Menshikov Kirill Sergeevich*<sup>1</sup>, D. Sc. *Zvegintsev Valery Ivanovich*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Institutskaya str., 4/1, Novosibirsk, 630090, Russia*

*Menshikov K.S.*, e-mail: [kirill.menshikov.1997@mail.ru](mailto:kirill.menshikov.1997@mail.ru)

*Zvegintsev V.I.*, e-mail: [zvegin@itam.nsc.ru](mailto:zvegin@itam.nsc.ru)

*Address for correspondence: Menshikov Kirill Sergeevich*, Novosibirsk state technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20.

### **Annotation**

In this work, an experimental study of the effects of the pulsed air jets on the surface of convective heat transfer of a boiler unit is carried out. A special experimental stand was made. The installation includes a pneumatic pulse generator PG-25/8 and cross-flow tubes with a constant pitch. Measurements of pressure in an unsteady air jet were carried. Graphs of the time dependence of the load on each tube are obtained.

### **Keywords**

Pulsed jets, supersonic speed, pneumatic pulse generator.

**УДК 533.6.011.5**

## **СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ ВО ВНУТРЕННЕМ ТРАКТЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ АВАРИЙНОГО СПАСЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ**

*Меньщикова Ирина Владимировна<sup>12</sup>, магистрант*

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

<sup>2</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1  
email: imenshhikova@yandex.ru

### **Аннотация**

Представлены результаты численного расчёта структуры течения во внутреннем тракте модели, моделирующей систему аварийного спасения космического корабля. Получено распределение основных газодинамических параметров течения. Показано, что в тракте устанавливается сложное пространственное отрывное течение, которое приводит к заметным потерям полного давления и неоднородному распределению газодинамических параметров на выходе из сопел двигателей системы аварийного спасения. Результаты исследования могут быть востребованы при проектировании аналогичных моделей, предназначенных для изучения высоконапорных струйных течений.

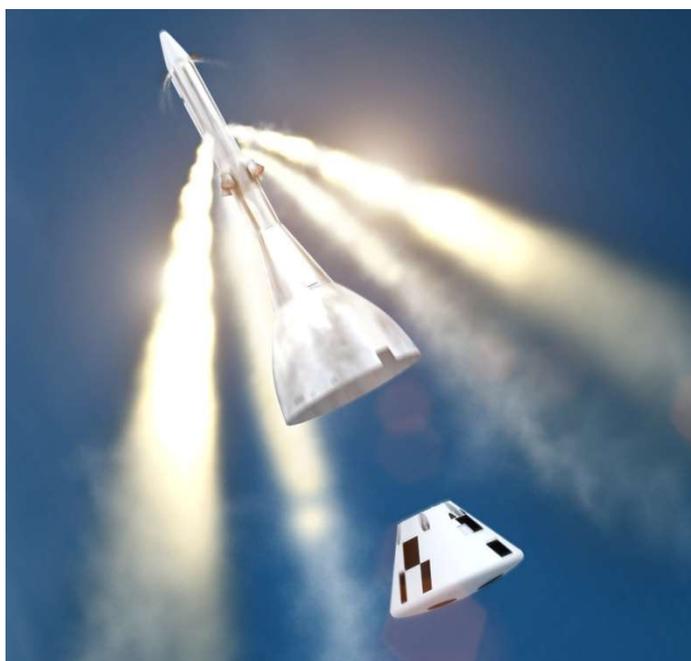
### **Ключевые слова**

Космический корабль; система аварийного спасения; внутреннее течение; сопло.

## **Введение**

В настоящее время в России и за рубежом разрабатываются перспективные космические аппараты, предназначенные для вывода экипажа на орбиту Земли. Такие корабли оснащаются системой аварийного спасения (САС), необходимой для спасения экипажа космического корабля (КК) в случае аварийной ситуации (рис. 1). Система представляет собой штангу, укрепленную на лобовой части корабля, на которой расположены двигатели выведения корабля на безопасное расстояние. Двигательная установка включает в себя камеру сгорания, подводный тракт, сопла.

В данной работе представлены результаты численного исследования структуры течения внутри модельного тракта, который включает в себя форкамеру, подводный канал и два сопла.



*Рис. 1.* Иллюстрация работы системы аварийного спасения на примере американского космического корабля «Орион» (по данным Интернет)

## **Методика численного исследования**

Математическая модель (рис. 2) имитирует внутренний тракт двигательной установки и включает в себя форкамеру (имитирует камеру сгорания двигательной установки) 1, вставку 2, подводный тракт 3, сопла 4. Всего в расчётной области содержится 755 тыс. ячеек.

Численный расчёт выполнен в программном пакете ANSYS Fluent. Решались трёхмерные уравнения Навье-Стокса, осреднённые по Фавру (уравнения Рейнольдса для сжимаемого течения). В качестве модели турбулентности выбрана двухпараметрическая дифференциальная модель  $k-\omega$  SST, показавшая ранее наилучшее совпадение с экспериментальными данными. Рабочее тело – холодный воздух.

Газодинамические параметры расчёта: среднее число Маха на выходном срезе сопла  $M = 2$ , отношение давления в форкамере установки к давлению на выходе из сопла (“nozzle pressure ratio”)  $N_{pr} = 60$ .

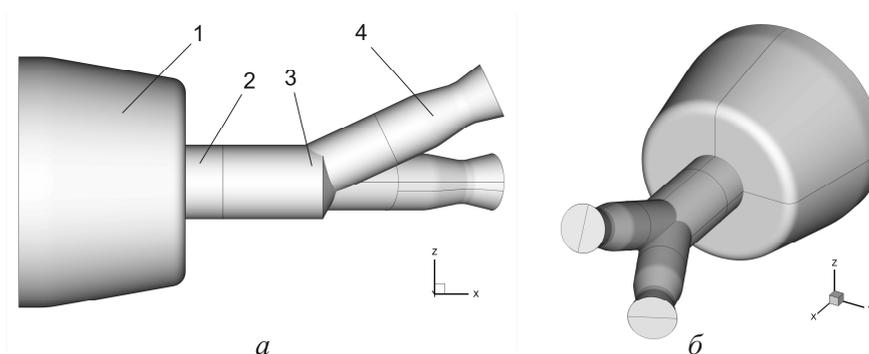


Рис. 2. Расчётная модель: а – вид сбоку, б – изометрия модели

Решение строилось методом установления с использованием противопоточной схемы второго порядка точности для аппроксимации производных газодинамических параметров течения и первого для аппроксимации параметров турбулентности.

Верификации результатов численного расчёта выполнена путём сравнения данных на выходном срезе сопла. Отмечено удовлетворительное соответствие, которое позволяет использовать данные численного расчёта для анализа течения в подводящем тракте модели САС.

### Результаты

На рис. 3 представлено распределение числа Маха в продольной вертикальной плоскости тракта (слева) и на выходном срезе одного из сопел (справа, распределение параметров потока во втором сопле такое же). Видна сложная структура отрывного течения в подводящем канале, которая приводит к неравномерному распределению параметров потока на выходе из сопла двигательной установки модели САС.

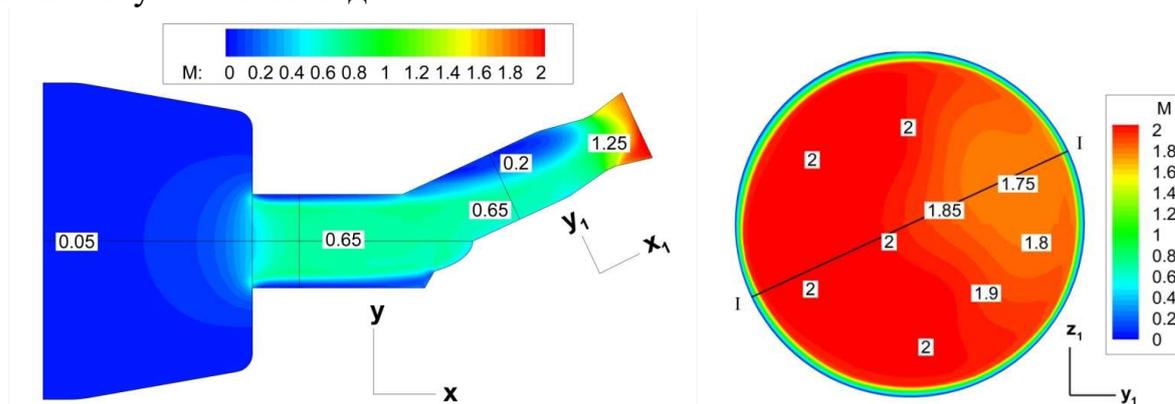


Рис. 3. Распределение числа Маха в продольном вертикальном сечении (слева) и в выходном сечении сопла (справа)

## **Заключение**

Проведено численное исследование течения во внутреннем тракте двигательной установки модели САС. Установлена картина сложного пространственного отрывного течения, которое приводит к неоднородному распределению газодинамических параметров на выходе из сопел. Такое течение является следствием ограниченной пропускной способности (по массовому расходу воздуха) тракта двигательной установки. Результаты исследования могут быть полезны при проектировании экспериментальных стендов и трактов двигательных установок, предназначенных для создания высоконапорных струйных течений.

## **THE FLOW STRUCTURE IN THE INTERNAL CHANNEL OF THE ESCAPE LAUNCH SYSTEM MODEL OF A SPACESHIP**

*Menshchikova Irina Vladimirovna<sup>1,2</sup>, graduate student*

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marks ave., Novosibirsk, 630073, Russia

<sup>2</sup>Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Institutskaya st., 4/1, Novosibirsk, 630090, Russia  
email:imenshchikova@yandex.ru

## **Annotation**

The numerical computation results of the flow structure in the internal channel of the model simulating the escape launch system of a spaceship. The numerical simulation was performed in ANSYS Fluent software package. The three-dimensional Favre-averaged Navier-Stokes equations (Reynolds equations for compressible flow) were solved. The turbulence model is the two-parameter differential  $k-\omega$  SST model, which previously showed the best agreement with experimental data. The test medium is a cold air. The distribution of the main gas-dynamic parameters of the flow is obtained. It is shown that a complicated three-dimensional separation flow is formed in the channel, which leads to losses of total pressure and nonuniform distribution of gas-dynamic parameters at the outlet of nozzles. The results can be useful in designing similar models for studying high-pressure jet flows.

## **Keywords**

Spaceship; escape launch system; internal flow; nozzle.

## О ВЗАИМОСВЯЗИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ И АЭРОИОННОГО СОСТАВА ВОЗДУХА ПОМЕЩЕНИЙ

*Игнатченко Юлия Константиновна<sup>1</sup>, магистрант;*

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет, 630073,  
Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (383)346-17-86

*Игнатченко Ю.К., e-mail: [julia.uu@bk.ru](mailto:julia.uu@bk.ru)*

*Адрес для корреспонденции: Игнатченко Юлия Константиновна,*  
Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г.  
Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (383)346-17-86

### Аннотация

В статье предлагается провести взаимосвязь аэроионного состава воздуха с электростатическим полем. В начале излагается, как формировалось знание о аэроионном составе воздуха, его влияние на человека и окружающую среду. Описаны такие определения, как аэроионы, ионизация и ионизаторы. Электростатическое поле существует вокруг каждой заряженной частицы. Следовательно, его связь с аэроионным составом воздуха связана напрямую, ведь аэроион – это молекулы, несущие заряд. При наличии только положительных аэроионов, электростатическое поле может только усиливаться и пагубно влиять на человека. Поэтому, для его нейтрализации используются биполярные ионизаторы, которые могут создавать и отрицательные и положительные аэроионы. Поэтому, для улучшения условий пребывания человека в помещении, именно биполярный ионизатор более оптимален. Но, нельзя исключать и другие факторы риска, влияющие на человеческий организм в целом.

**Ключевые слова:** ионизация, аэроионы, аэроионный состав воздуха, напряженность электростатического поля, ионизаторы, окружающая среда

### 1. Введение

Для создания комфортных условий пребывания человека в помещении, нужно позаботиться не только о типичных вредных факторах (температура, влажность воздуха, освещенность и т.д.), но и улучшить качество воздуха – а именно аэроионный состав воздуха. Изучение аэроионного состава воздуха началось еще задолго до научно-технической революции. Проблемой аэроионификации занимался великий врач Гиппократ (400 гг. до н.э.), первым предложив создавать аэрарии – специальные площадки для прогулок в горах, либо около моря. Так начинается зарождающееся древнее врачевание человеческих недугов – аэротерапия. Первыми попытками связать целебные действия

воздуха с его электрическими зарядами относят к началу XVIII века, где уже создавались электростатические машины, применяемые для проведения электрических ванн. Но так ли это помогало [1]?

## **2. Материалы и методы исследования**

М.В.Ломоносов в середине XVIII века занялся изучением аэроионного состава воздуха и его взаимосвязи с атмосферным электричеством. Он предполагал, что болезни человека связаны с нарушением способности нашего тела воспринимать атмосферное электричество. В связи с этим, люди увидели, что электричество может быть весьма полезна человечеству и уже в 1780 было впервые использовано статическое электричество для улучшения качества жизни окружающей среды. Опыт заключался в том, что шло воздействие статического электричества на сельскохозяйственные участки с семенами. Которые по итогу росли быстрее и овощи, и фрукты обладали лучшим вкусом и видом в целом. П. Бертолон, проводивший этот опыт, предложил электризацию воздуха помещений в профилактических и лечебных целях. Для этого была рекомендована именно отрицательная аэроионизация воздуха, как наиболее целебная. Но результаты для того времени были обнадеживающие [2].

В XIX веке началось стремительное изучение электричества. Многочисленные исследования разнились между собой, и разные авторы получали противоположные результаты. Изучение аэроионного состава воздуха на этом не закончилось. Большой вклад в развитие внес А.Л. Чижевский - российский биофизик, ученый, который первым заметил взаимосвязь аэроионного состава воздуха с полярностью электростатического поля. В 1898 г. И. Эльстер и Г. Гейтель обнаруживают носители атмосферного электричества – ионы газов воздуха. Позднее Чижевский дает им точное название – аэроионы (АИ). Аэроионы - это мельчайшие комплексы атомов или молекул, несущие положительный или отрицательный заряд. В зависимости от размеров и подвижности, различают три группы аэроионов: легкие, средние и тяжелые. Отрицательные аэроионы (ОАИ) представлены кислородом, который легко захватывает извне свободные электроны, что и превращает нейтральные молекулы газа в отрицательные аэроионы. Положительные аэроионы представлены углекислым газом и азотом. Количество ОАИ положительно влияет на человека. Оно зависит от условий воздуха, времени года, часов суток, влажности, температуры и загрязненности воздуха. В 1 см<sup>3</sup> живого воздуха в солнечный день находится около 1 тыс. ОАИ (табл. 1) [3]. У морей, гор и водопадов число достигает 5-15 тыс. А во время шторма в море – до 100 тыс ОАИ. Положительные аэроионы практически отсутствуют в таком воздухе. В городе же и в помещениях количество ОАИ может не превышать и 50% нормы, а ближе к концу рабочего дня падает до 5-10%. Число положительных аэроионов во много раз возрастает, что приводит к дурному самочувствию, усталости и снижению работоспособности. Исследования А.Л.Чижевского доказали, что кислород должен быть обязательно ионизирован для сохранения человеческого здоровья [4].

Таблица 1. Число легких аэроионов в 1 см<sup>3</sup> воздуха в различных местах земного шара

Местность и вид воздушного транспорта	Число аэроионов	
	положительных	отрицательных
Тихий океан	419	419
Средиземное море	901	586
Мюнхен	1110	880
Лионский залив	398	377
Ледник Алеч	2860	1820
Давос	1236	1006
Западная Исландия	1006	1006

Ионизация – это физический процесс отрыва электрона от молекул или атомов газов, в результате чего из одной нейтральной молекулы образуются две с разным зарядом: отрицательная, получившая «бонусный» электрон, и положительная, которая его потеряла [5]. Как и говорилось ранее, в окружающей среде ионизация воздуха происходит естественным путем, например, на море или в горах. Воздух в естественной среде ионизируется с помощью молний и космического излучения. Аэроионы и делают свежий природный воздух полезным человеку. Ионизация воздуха в квартире естественным образом не происходит, так как нет прямого воздействия ее природных источников. Поэтому человеку в будущем пришлось прибегнуть к специальному прибору – ионизатору (люстры Чижевского). Применение первых ионизаторов воздуха приходится на 20 годы XX века, так называемых люстр Чижевского [3]. Они показали замечательные результаты положительного влияния на организм животных и человека. В последствии работы и исследования различных ученых XX века привели к началу производства ионных генераторов. Это вызвало большой научный резонанс. Было получено много дополнительных полезных сведений о положительном влиянии ОАИ на человека. Но, так ли ОАИ полезны [6]? Чтобы воздух был полностью ионизирован и в нем присутствовали только легкие ОАИ, так полезные человеку, нужно учитывать массу факторов. Такие, как температура, электростатическое поле, относительная влажность воздуха, загазованность, скорость движения воздуха и т.д. Рассмотрим взаимосвязь аэроионного состава воздуха и электростатического поля [7].

Электростатическое поле - электрическое поле, создаваемое неподвижными (статичными) зарядами. В производственных и общественных помещениях электростатическое поле может создаваться различными электрическими приборами, видеодисплейными терминалами и различной оргтехникой [8]. В жилом же помещении отделка, мебель, различные покрытия, способные накапливать электростатический заряд при трении, эксплуатируемое разнообразное оборудование, способное создавать электростатические поля и т.д. По статистике, большинство жилых и производственных помещений имеют

выраженный недостаток легких ОАИ. При наличии электростатического поля концентрация легких положительных ионов примерно оптимальная, концентрация же легких ОАИ значительно ниже минимального допустимого уровня. Это неблагоприятно сказывается на организм человека, приводя к нарушению нервной системы, сердечным заболеваниям и различным недомоганиям [9]. Но, если к производственным и общественным помещениям применяют СанПиН 2.2.4.1294-03 [11] и особое внимание Роспотребнадзора для контролирования ситуации аэроионного состава воздуха, как нам ионизировать воздух в жилом помещении? Электростатическое поле является носителем четко направленных статичных зарядов. Аэроионы тоже представляют собой носители зарядов, но только они не имеют определенной направленности. При ионизации воздуха униполярным ионизатором (однополярным), происходит направленное воздействие и образуется электростатическое поле, замыкаясь в ближайшую поверхность. При ионизации воздуха биполярным ионизатором, дающим одновременно и положительные и отрицательные ионы, разрушается и нейтрализуется электростатическое поле, если оно уже было в помещении [10].

### **3. Вывод**

Проанализировав и сделав вывод, можно сказать, что взаимосвязь аэронного состава воздуха и электростатического поля присутствует. Что электростатическое поле, что положительные аэроионы пагубно сказываются на здоровье человека, конечно, при концентрациях, превышающих норму. Поэтому для его нейтрализации лучше всего использовать биполярные современные ионизаторы, которые убивают двух зайцев сразу. При недостаточной концентрации ОАИ, наблюдаются головные боли, усталость, нервные расстройства, которые усугубляются присутствием электростатического поля. Вот, почему большинство людей чувствуют себя плохо, придя домой с прогулки в парке или же приехав с курорта, где был хороший аэроионный состав воздуха. Из-за недостаточно хорошего изучения данной проблемы нельзя уверять на все 100%, что именно состав аэроионного воздуха может так влиять на организм человека, нужно учитывать и другие факторы – возраст, образ жизни, заболевания, качество пищи и воды, потребляемые человеком. Так же производственные факторы, которые могут оказывать влияние на концентрацию аэроионов. Но, нельзя отрицать и теорию, что при ионизации воздуха и увеличении отрицательных аэроионов, путем нейтрализации электростатического поля можно создать для человека комфортные условия жизни.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Скипетров В.П. Аэроионы и жизнь. - Изд. 4-е, перераб. - Саранск: Тип. "Крас. Окт.", 2011. – 136 с.
2. Скипетров В.П. Аэроионы и жизнь. - Саранск: Тип. "Крас. Окт.", 1997. – 114 с.

3. Чижевский А.Л. Аэроионификация в народном хозяйстве. - 2-е изд., - М.: Стройиздат, 1989. - 488 с.
4. Черный, Константин Анатольевич. Проблема оценки и взаимосвязи аэрозольного загрязнения и аэроионного состава воздуха рабочей зоны: автореферат дис. ... доктора технических наук: 05.26.01 / Черный Константин Анатольевич; [Место защиты: Балт. гос. техн. ун-т (ВОЕНМЕХ) им. Ф.Д. Устинова], Санкт-Петербург, 2013. – 43 с.
5. Черный К.А. Физические параметры и способы формирования биопозитивной воздушной среды в замкнутых помещениях: Дис. канд. техн. наук. – Пермь, 1999. – С. 49-59.
6. Черный К. А., Храмов А. В. Особенности и основные закономерности формирования аэроионного состава воздуха при проведении профилактических и физиотерапевтических сеансов в помещениях различного назначения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – №8 (109).– С. 196–200.
7. Плетенева Т. В., Максимова Т. В., Ходорович Н. А., Сыроешкин А. В. Аэроионы и среда обитания человека // Вестник российского университета дружбы народов. Серия: Медицина. – 2012. – №2.–С. 28–34.
8. Петрякова О. Д., Алексеев И. С. Аэроионный состав воздушной среды воздуха рабочей зоны на примере учебного корпуса ВУиТ // ВЕСТНИК ВОЛЖСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМ. В.Н. ТАТИЩЕВА. – 2009. – №8.–С. 105–108.
9. Р 2.2.2006-05. “Гигиена труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда” [Электронный ресурс]: утверждено Главным государственным санитарным врачом РФ 29 июля 2005 г. Доступ из справ.-правовой системы “КонсультантПлюс”.
10. МУК 4.3.1675-03. 4.3. Физические факторы. Общие требования к проведению контроля аэроионного состава воздуха. Методические указания. [Электронный ресурс]: утверждены Минздравом России 29 июня 2003 г. Доступ из справ.-правовой системы “КонсультантПлюс”.
11. СанПиН 2.2.4.1294-03 “Гигиенические требования к аэроионному составу воздуха производственных и общественных помещений”. [Электронный ресурс]: утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 22 апреля 2003 г. N 64. Доступ из справ.-правовой системы “КонсультантПлюс”.

## **ON THE RELATIONSHIP BETWEEN THE ELECTROSTATIC FIELD AND THE AIR IONIC COMPOSITION OF INDOOR AIR**

***Ignatchenko Julia Konstantinovna<sup>1</sup>, graduate student;***

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20, tel. (383) 346-17-86

***Ignatchenko J.K., e-mail: [julia.uu@bk.ru](mailto:julia.uu@bk.ru)***

*Address for correspondence: Ignatchenko Julia Konstantinovna,*

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20, tel. (383) 346-17-86

### **Annotation**

The article proposes to conduct a relationship between the air ionic composition of the air and the electrostatic field. At the beginning, it is stated how the knowledge about the aero-ionic composition of the air, its influence on humans and the environment was formed. Definitions such as aeroions, ionization and ionizers are described. An electrostatic field exists around every charged particle. Consequently, its connection with the aeroionic composition of the air is directly related, because aeroion is a charge-carrying molecule. In the presence of only positive air ions, the electrostatic field can only intensify and adversely affect a person. Therefore, bipolar ionizers are used to neutralize it, which can create both negative and positive air ions. Therefore, to improve the conditions for a person's stay in a room, it is a bipolar ionizer that is more optimal. However, other risk factors that affect the human body as a whole cannot be ruled out.

**Key words:** ionization, air ions, air ionic composition of air, electrostatic field strength, ionizers, environment

УДК 533.6

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЁХМЕРНОГО СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРА С ПЕРЕДНЕЙ ГАЗОПРОНИЦАЕМОЙ ПОРИСТОЙ ВСТАВКОЙ ПОД УГЛОМ АТАКИ**

*Милицина Татьяна Сергеевна<sup>1,2</sup>, студент;*

*Поплавская Татьяна Владимировна<sup>1</sup>, д.ф.-м.н., проф.*

<sup>1</sup> Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1 Тел. (383) 330-42-68  
e-mail [admin@itam.nsc.ru](mailto:admin@itam.nsc.ru)

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия,  
г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (913)005-48-19

*Милицина Т.С.*, e-mail [mili\\_tanya@mail.ru](mailto:mili_tanya@mail.ru)

*Адрес для корреспонденции: Милицина Татьяна Сергеевна, Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (913)005-48-19*

## Аннотация

В данной работе рассматривается трехмерное обтекание цилиндра с газопроницаемой передней вставкой из высокопористого ячеистого материала (ВПЯМ) с пористостью  $k=0.95$  под углом атаки. Структура ВПЯМ моделируется системой колец разного диаметра, расположенных в шахматном порядке в радиальном и продольном направлениях (кольцевая скелетная модель пористой среды). В работе проведено построение кольцевой скелетной модели для образца материала с диаметром пор  $d = 2\text{ мм}$  и получены количественные данные о влиянии ВПЯМ на аэродинамическое сопротивление цилиндра с передней пористой вставкой в сверхзвуковом потоке ( $M_\infty = 7$ ,  $Re_{1\infty} = 1.5 \times 10^6\text{ м}^{-1}$ ).

## Ключевые слова

Высокопористые материалы, сверхзвуковые течения, снижение аэродинамического сопротивления, численное моделирование.

## Постановка задачи

Численное моделирование задачи осесимметричного обтекания цилиндра с газопроницаемой передней вставкой проводилось с помощью газодинамического пакета общего назначения ANSYS Fluent. В работе решалась система трехмерных уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу. Для аппроксимации конвективных потоков использовался Roe-FDS метод расщепления с TVD-ограничителем для сохранения монотонности решения вблизи разрывов и локальных экстремумов течения.

Проекция расчетной области на плоскость (Рис.1) представляет собой прямоугольник, нижняя сторона которого совпадает с осью симметрии цилиндра. В численном моделировании использовалась скелетная модель пористой среды в виде системы соосных колец разного диаметра, расположенных в шахматном порядке (Рис.2). В плоскости осевого сечения данная система колец (каркас пористого материала) представляет собой набор непроницаемых элементов, расположенных в шахматном порядке (см Рис. 1). Расчеты задачи проводились методом установления.

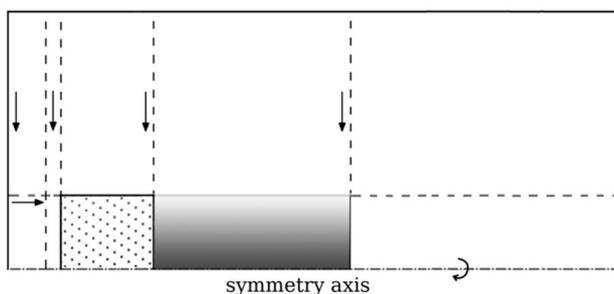


Рис. 1. Проекция на плоскость  $xr$  расчетной области с представлением разбиений на зоны и направлением сгущения расчетной сетки

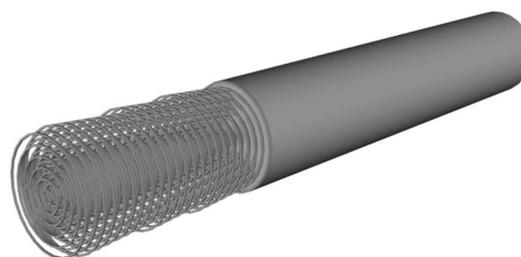


Рис. 2. 3D-изображение расчетной модели: диаметр пор  $d=2\text{ мм}$

Построение трехмерной пористой зоны осуществлялось в программном комплексе САПР SolidWorks, на основе ранее построенного двумерного эскиза кольцевой скелетной модели. Полученный фрагмент расчетной области, содержащий скелет ВПЯМ (Рис.3), экспортируется в ANSYS Workbench для построения трехмерной нерегулярной расчетной сетки.

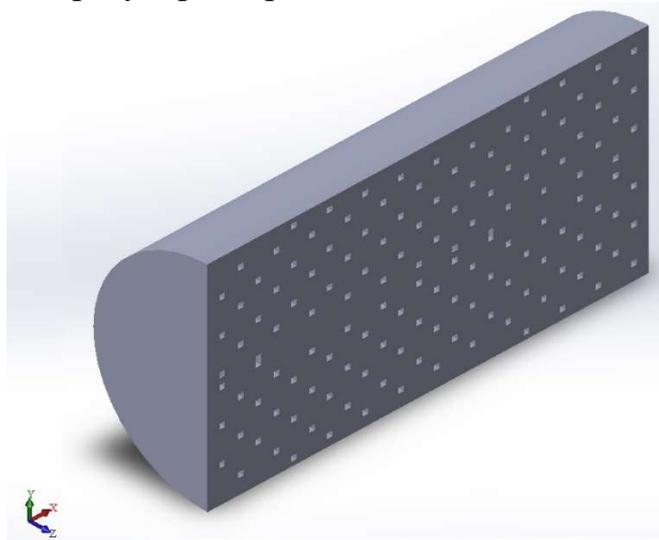
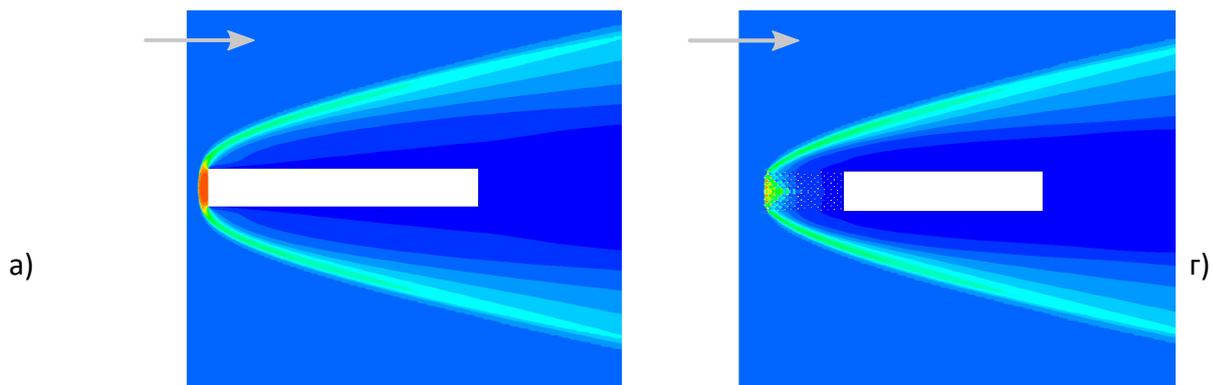


Рис. 3. Фрагмент расчетной области, содержащий скелет ВПЯМ

### Результаты

Были проведены расчеты обтекания цилиндра диаметром  $D = 14.5$  мм с передней пористой вставкой длиной  $\Delta x = 29$  мм и с диаметром пор ВПЯМ  $d = 2$  мм при условиях набегающего потока  $M_\infty = 7$ ,  $T_\infty = 26.85$  К,  $Re_{1\infty} = 1.5 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$ .



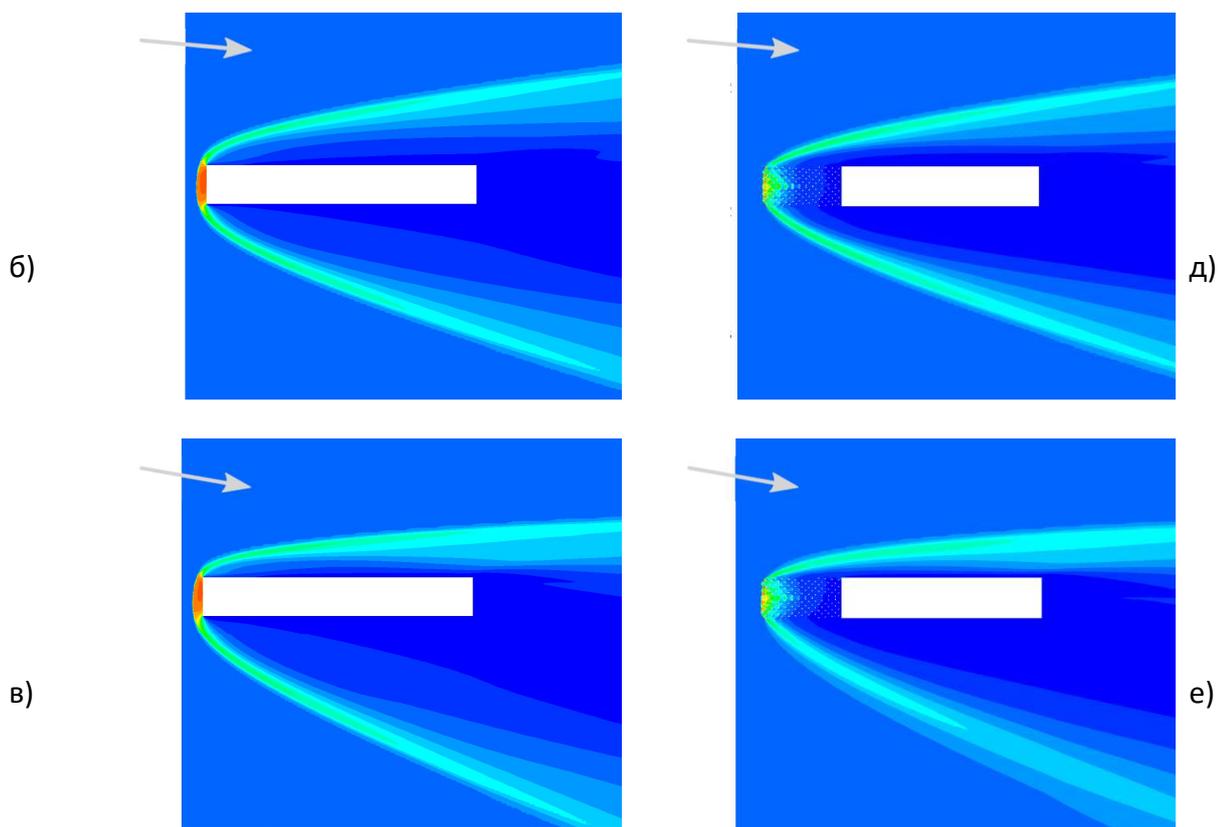


Рис. 4. Расчетные поля плотности  $M_\infty=7$ ,  $Re_1=1.5 \times 10^6$  1/м при обтекании сплошного цилиндра (а-в) и цилиндра с передней пористой вставкой  $\Delta x = 29$ мм,  $k=0,95$ ,  $d=2$ мм (г-е) под разными углами атаки:  
 (а,г) -  $\alpha=0$ ; (б, д) -  $\alpha=5^\circ$ ; (в, е) -  $\alpha=10^\circ$

На Рис. 4 видно, что на сплошном цилиндре (Рис.4а-в) при всех углах атаки перед передним торцом цилиндра формируется отошедший дугообразный головной скачок уплотнения. При этом с ростом угла атаки головной скачок с наветренной поверхности прижимается к поверхности цилиндра, а с подветренной – отодвигается от поверхности. В случае цилиндра с передней пористой вставкой (Рис.4г-е) головной скачок уплотнения присоединяется к переднему торцу модели. При этом изменяется угол наклона скачка уплотнения к поверхности цилиндра, он уменьшается по сравнению с картиной обтекания сплошного цилиндра. Интенсивность головного скачка уплотнения на подветренной стороне модели с передней пористой вставкой значительно меньше, чем при обтекании сплошного цилиндра.

В таблице 1 представлено сравнение расчетных коэффициентов сопротивления сплошного цилиндра  $C_{x0}$  и цилиндра с передней пористой вставкой из ВПЯМ с  $d = 2$ мм ( $C_x$ ) с экспериментальными данными, полученными в аэродинамической трубе Т-327А ИТПМ СО РАН, и с расчетными данными. Результаты сравнения приведены в таблице. Видно согласие расчетных и экспериментальных данных и существенное (до 30%) снижение

аэродинамического сопротивления для цилиндров с передней пористой вставкой.

Таблица 1 – Сравнение результатов численного моделирования и эксперимента по аэродинамическому коэффициенту сопротивления.  $k = 0.95$ ,  $d = 2\text{мм}$ ,  $\Delta x = 29\text{мм}$ ,  $M_\infty = 7$ ,  $Re_{1\infty} = 1.5 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$ ,  $\alpha = 0-10^\circ$ .

$C_x$	$\alpha = 0$	$\alpha = 5^\circ$	$\alpha = 10^\circ$
Эксперимент	1,34± 0,025	1,372± 0,015	1,398± 0,015
Численное моделирование	1,337	1,386	1,3986
$C_x/C_{x0}$ расчет	0,73	0,757	0,761

**Работа выполнена по тематике гранта РФФИ (грант № 19-08-00113)**

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миронов С.Г., Маслов А.А., Поплавская Т.В., Кириловский С.В. Моделирование обтекания газопроницаемого пористого материала в приложении к сверхзвуковой аэродинамике // ПМТФ 2015, т. 56, № 4, С. 12-22.
2. Кириловский С.В., Маслов А.А., Миронов С.Г., Поплавская Т.В. Применение скелетной модели высокопористого ячеистого материала для моделирования сверхзвукового обтекания цилиндра с передней газопроницаемой вставкой // Известия РАН. МЖГ. 2018, № 3, С. 1-9.
3. Maslov A.A., Mironov S.G., Poplavskaya T.V., Kirilovskiy S.V. Supersonic flow around a cylinder with a permeable high-porosity insert: experiment and numerical simulation // JFM. 2019. V. 867. P. 611-632.

### NUMERICAL SIMULATION OF A THREE-DIMENSIONAL SUPERSONIC CYLINDER FLOW WITH A FRONT GAS-PERMEABLE POROUS INSERT AT THE ATTACK ANGLE

*Militsina Tatyana Sergeevna<sup>1,2</sup>, a student;*

*Poplavskaya Tatyana Vladimirovna<sup>1</sup>, Doctor of Physics and Mathematics, prof.*

<sup>1</sup> Institute of Theoretical and Applied Mechanics. S.A. Khristianovich

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,

630090, Russia, Novosibirsk, ul. Institutskaya, 4/1 Tel. (383) 330-42-68

e-mail [admin@itam.nsc.ru](mailto:admin@itam.nsc.ru)

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx

Ave., 20, tel. (913)005-48-19

*Militsina T.S.*, e-mail [mili\\_tanya@mail.ru](mailto:mili_tanya@mail.ru)

Address for correspondence: Militsina Tatyana Sergeevna, Novosibirsk State  
Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20,  
tel. (913)005-48-19

**Annotation.**

The paper presents quantitative data on the effect of the front insert made of highly porous cellular material on the aerodynamic drag of the cylinder in a supersonic flow.

**Keyword:** Supersonic flow, highly porous materials, impedance, numerical simulation, reducing aerodynamic drag.

# **СЕКЦИЯ: ТЕХНИКА И ФИЗИКА НИЗКИХ АППАРАТУР. СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

УДК 629.7.048

## **ГИПОДИНАМИЯ В НЕВЕСОМОСТИ: ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ КОМПЕНСАЦИИ**

*Беляева Елизавета Валерьевна, студент; Гагаркина Елизавета Сергеевна,  
студент; Хромова Ирина Владимировна, к.т.н., доцент*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия,  
г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. +7(913)782-05-50

*Беляева Е.В., e-mail: liza\_belaeva\_2014@mail.ru*

*Гагаркина Е.С., e-mail: gagarkina.liza@mail.ru*

*Хромова И.В., e-mail: xromova@corp.nstu.ru*

*Адрес для корреспонденции: Новосибирский государственный технический  
университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20*

### **Аннотация:**

В работе описаны механизмы негативного воздействия гиподинамии на органы и основные жизненно важные системы организма человека. Выявлены особенности работы кровеносной системы при недостаточной физической активности, а так же в результате тяжелой формы гиподинамии. Выполнен комплекс модельных исследований для сравнения влияния гиподинамии в невесомости и на Земле. Проведен анализ способов компенсации в зависимости от возраста, гендера, типа конституции и двигательной активности, в том числе сравнивается эффективность упражнений на различные группы мышц. Отдельное исследование посвящено влиянию избытка и недостатка жировой ткани и мышечной массы на работу кровеносной системы, при нормальной физической активности и недостаточной.

### **Ключевые слова:**

Гиподинамия, невесомость, кровеносная система, компенсация, двигательная активность, тип конституции, организм человека, эффективность упражнений, мышечная масса, избыточный вес.

Актуальной задачей в области безопасности космических полетов является разработка средств защиты, направленных на компенсацию нарушений в организме человека вследствие гиподинамии в условиях длительной невесомости. В настоящее время существенно расширились границы физического состояния космонавтов, допускаемых к полетам в космос. Наряду с широкими гендерными и возрастными рамками, можно выделить три

характерные группы по типу двигательной активности: специалисты-операторы, бортинженеры, тренированные космонавты (например, военные летчики). Пониженная двигательная активность отрицательно сказывается на состоянии не только мышечной системы в виде атрофических изменений двигательного аппарата, но и сердечно-сосудистой, а также многих других систем организма.

Наиболее сильно от воздействия гиподинамии страдают опорно-двигательная и сердечно-сосудистая системы. Снижение тонуса мышц приводит к уменьшению мышечной массы и деминерализации костной ткани. Уменьшение нагрузки на сердечно-сосудистую систему ведет к снижению массы и силы сердечной мышцы, нарушению обмена веществ в клетках сердца; ухудшению состояния кровеносных сосудов, а также к уменьшению их числа.

Наиболее эффективным способом нейтрализации негативного воздействия данных факторов являются тренажеры, формирующие заданную физическую нагрузку. Особое значение при этом имеют индивидуальные особенности организма для различных возрастов, пола, а также состояния организма: типа конституции, вида двигательной активности, веса.

Цель настоящей работы – исследование влияния возраста, гендера, типа двигательной активности человека, вида и величины физической нагрузки на различные группы мышц при разработке средств борьбы с гиподинамией в условиях невесомости и на Земле.

В работе проводится анализ распределении крови по потребителям на Земле и в невесомости (см. Рисунок 1). При попадании в невесомость наблюдается значительное перераспределение крови от ног к голове, что в свою очередь приводит к необходимости учета этого момента при компенсации недостатка нагрузки на мышечный аппарат. Кроме того, проводится исследование влияния сосудистых реакций (спазм/расширение) на кровоснабжение остальных потребителей (см. Рисунок 2).

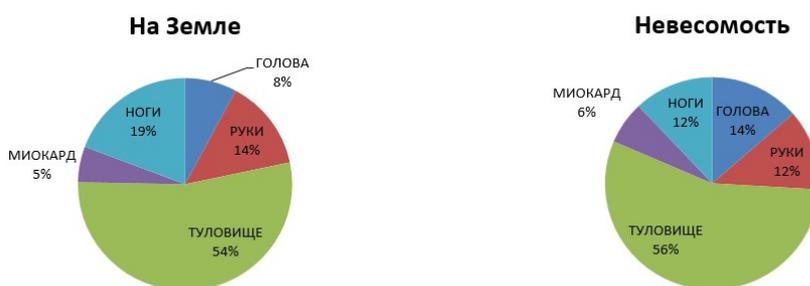


Рисунок 1. Сравнение распределения крови по потребителям (минутный объем крови (МОК) в % от общего количества циркулирующей крови) на Земле и в невесомости

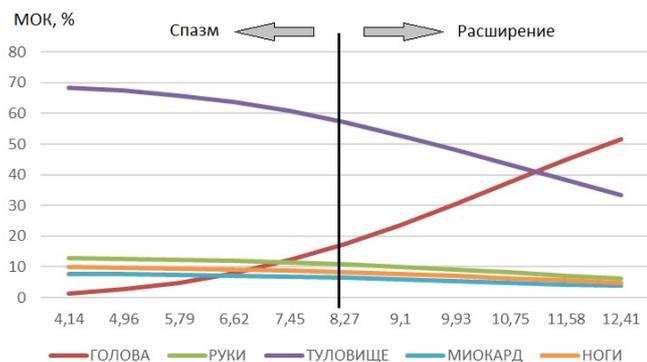


Рисунок 2. Влияние спазма/расширения капилляров в голове на перераспределение крови между остальными потребителями в условиях невесомости

В рамках представленной задачи выполняется комплекс расчетных исследований воздействия гиподинамии различной степени тяжести на работу кровеносной системы человека для разного пола и возраста. Установлено, что возраст не оказывает значимого влияния, в отличие от гендера (см. Рисунок 3).

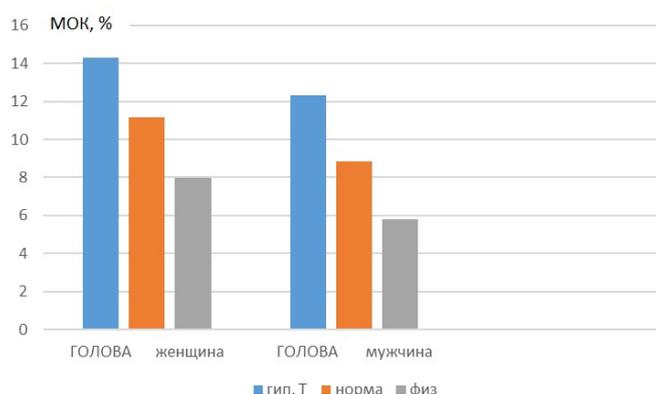
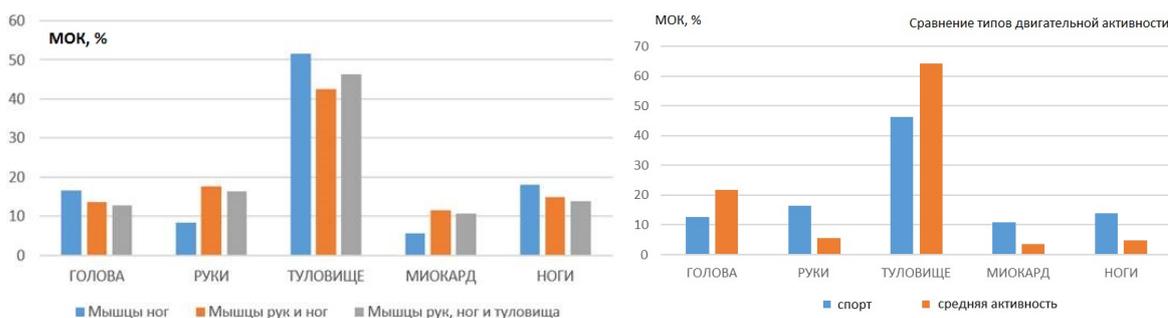


Рисунок 3. Сравнение расхода крови на голову при гиподинамии тяжелой формы, норме и физической активности для мужчин и женщин на Земле

Проводится оценка влияния различных типов двигательной активности, видов и интенсивности физической нагрузки для компенсации негативного воздействия гиподинамии в невесомости (Рисунок 4). Отдельно исследуется эффективность различных типов тренажеров для кардио- и силовых видов тренировок.



а

б

Рисунок 4. Сравнение различных типов тренировок (а) и типа двигательной активности (б) для компенсации гиподинамии в условиях невесомости

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курмазенко Э.А. Конструирование тепломассообменных аппаратов систем жизнеобеспечения : Учеб. пособие / Э. А. Курмазенко; Моск. авиац. ин-т им. Серго Орджоникидзе М. : Изд-во МАИ, 1991.
2. Пичулин В.С. Математическое моделирование и проектирование индивидуальных систем жизнеобеспечения экипажей космических аппаратов : Учеб. пособие. – М.: МАИ, 2001. – 88 с.
3. Чичиндаев А. В. Теплообмен в системе «человек – окружающая среда» в условиях низких температур : монография / А. В. Чичиндаев, И. В. Хромова. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. - 214 с - (Монографии НГТУ). - 3000 экз. - ISBN 978-5-7782-3492-5.
4. I.V. Khromova, Heat Exchange in “Human body - Thermal protection – Environment System,” Journal of Physics: Conference Series, 2017. doi:10.1088/1742-6596/891/1/012084.
6. Березовский В.А. Колотилов Н.Н. Биофизические характеристики тканей человека. Справочник. – Киев.: Наук. думка, 1990. – 224 с.
7. Основы космической биологии и медицины. Том I. Космическое пространство как среда обитания. М.: Наука, 1975. - 450 с.
8. Основы космической биологии и медицины. Том II. Книга первая. Экологические и физиологические основы космической биологии и медицины. М.: Наука, 1975. - 422 с.

### HYPODYNAMY IN WEIGHTLESSNESS CONDITIONS: INVESTIGATION OF EFFECTIVENESS OF COMPENSATION MEANS

*Beliaeva Elizaveta Valerevna*, student, e-mail: [liza\\_belaeva\\_2014@mail.ru](mailto:liza_belaeva_2014@mail.ru)

*Gagarkina Elizaveta Sergeevna*, student, e-mail: [gagarkina.liza@mail.ru](mailto:gagarkina.liza@mail.ru)

*Khromova Irina Vladimirovna*, Phd, e-mail: [xromova@corp.nstu.ru](mailto:xromova@corp.nstu.ru)

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk,  
K. Marx Ave. 20

The work describes the mechanisms of negative effects of hypodynamy on the organs and the main vital systems of the human body (musculoskeletal system, blood circulation, respiration, and digestion). The features of the circulatory system with insufficient physical activity, as well because of severe hypodynamy, are reveal. A set of model studies perform to compare the effects of hypodynamy in weightlessness and on Earth. The analysis of ways to compensate for the negative effects of weakening the body's muscle activity depending on gender, age, type of constitution and motor activity, including the effectiveness of exercise on different muscle groups.

A separate study is devoted to the effect of excess and lack of adipose tissue and muscle mass on the work of the circulatory system, with normal physical activity and insufficient.

*Key words:* physical inactivity, weightlessness, circulatory system, compensation, motor activity, type of constitution, human body, exercise efficiency, muscle mass, overweight.

**УДК 536.253**

## **СВОБОДНАЯ КОНВЕКЦИЯ ОКОЛО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ ПОСТОЯННОМ ТЕПЛОВОМ ПОТОКЕ**

*Гоппе Анастасия Александровна, студент; Лозовский Михаил Вячеславович, студент; Горбачев Максим Викторович, к.т.н., доцент*  
Новосибирский государственный технический университет, 630073,  
Россия,

г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

*Гоппе А. А.*, email [goppe.2017@stud.nstu.ru](mailto:goppe.2017@stud.nstu.ru)

*Лозовский М. В.*, e-mail [lozovskij.2017@stud.nstu.ru](mailto:lozovskij.2017@stud.nstu.ru)

*Адрес для корреспонденции:* Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (908)106-37-37

### **Аннотация**

В работе представлено численное исследование свободной конвекции около вертикальной пластины с постоянным тепловым потоком. Дифференциальные уравнения преобразуется в систему нелинейных уравнений третьего порядка. Полученная система решается в программе Mathcad. Получены значения функций  $f(\xi)$  и  $\theta(\xi)$ . Данные исследования сравниваются с экспериментальными данными, опубликованными в литературе. Так же были построены профили скоростей и температуры на расстоянии 25, 50, 75, 100% от длины пластины и зависимость температуры стенки от длины пластины.

**Ключевые слова:** Постоянный тепловой поток, свободная конвекция, численное моделирование, *Mathcad*, вертикальная пластина.

Явление естественного конвективного теплообмена широко применяется в науке и технике, например, в электронном оборудовании, в теплообменных аппаратах, теплоизоляции, кондиционировании воздуха.

До настоящего времени естественная конвекция около вертикальной пластины изучалась многими исследователями при разных типах граничных условий. Основное внимание в литературе уделено исследованию изотермических условий на стенке. Задача свободно-конвективного течения

около вертикальной пластины с постоянным тепловым потоком изучена не достаточно полно.

Впервые задача о ламинарном свободно-конвективном теплообмене была рассмотрена Лоренцом в 1881 году, предположив, что температура и скорость в любой точке поля зависят только от расстояния до пластины.

Первое решение свободной конвективной задачи для вертикальной плоской пластины было получено Pohlhausen в 1921 году. Pohlhausen преобразовал дифференциальные уравнения в частных производных в обыкновенное дифференциальное уравнения.

Позже дифференциальные уравнения были решены Sparrow and Gregg, путем введения безразмерных параметров. Sparrow and Gregg вычислили параметры теплоотдачи для чисел Прандтля от 0,01 до 100. Было показано, что результаты исследований хорошо согласуются с решением Ostrach для изотермических граничных условий.

В настоящей работе рассматривается случай ламинарного стационарного обтекания вертикальной плоской пластины с постоянным тепловым потоком, подводимым к поверхности стенки. Свойства воздуха ( $\lambda$ ,  $\nu$ ,  $c_p$ ) считаются постоянными, кроме плотности (является функцией температуры). Пластина расположена так, что ось  $x$  совпадает с направлением потока, а ось  $y$  направлена нормально к поверхности пластины.

Используя допущения и вводя безразмерные переменные, систему дифференциальных уравнений, описывающих гидродинамику и теплообмен в пограничном слое на вертикальной пластине, можно записать в следующем виде:

$$f''' - 3(f')^2 + 4ff' - \theta = 0, \quad (1)$$

$$\theta'' - \text{Pr}(4f\theta' + f'\theta) = 0. \quad (2)$$

При этом граничные условия запишутся в виде:

$$\text{при } \xi = 0: f' = 0, \theta' = 1,$$

$$\text{при } \xi \rightarrow \infty: f' = 0, \theta = 0.$$

Уравнения (1) и (2) представляют собой систему нелинейных дифференциальных уравнений с не жесткими граничными условиями и должны решаться одновременно. Для решения поставленной задачи в программе *Mathcad* необходимо найти недостающие условия в начальной точке  $\theta(0)$  и  $f''(0)$ , для этого была использована функцию SBVAL и функция RKFIXED для нахождения численного решения задачи по методу Рунге–Кутты. На Рисунке 1 показано изменение значений функции  $f''(\xi)$  и  $\theta(\xi)$  полученных с помощью численного решения при  $\text{Pr}=0,72$ . Профиль скорости имеет максимум при  $\xi = 0,8$  при этом функция температуры монотонно убывает.

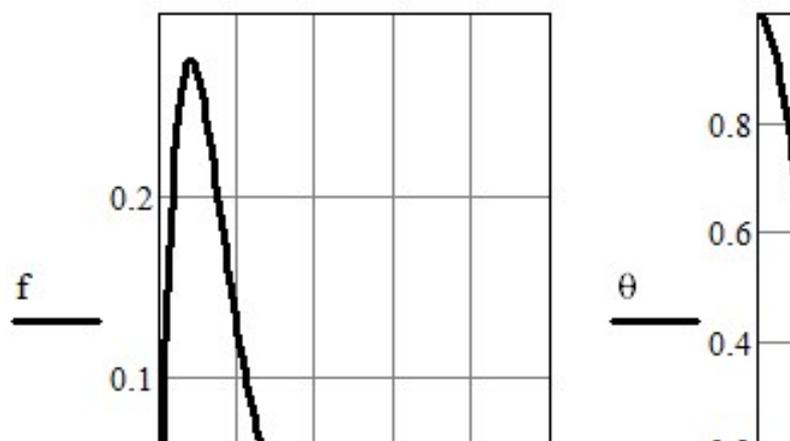


Рисунок 1. Безразмерные профили скорости и температуры

На Рисунке 2 показаны профили компонентов скоростей и температуры на расстоянии 25, 50, 75, 100% от длины пластины. Скорость потока увеличивается в каждом сечении от  $0,25L$  до  $L$ . Из графика распределения температуры видно что, при удалении от начала координат температура увеличивается.

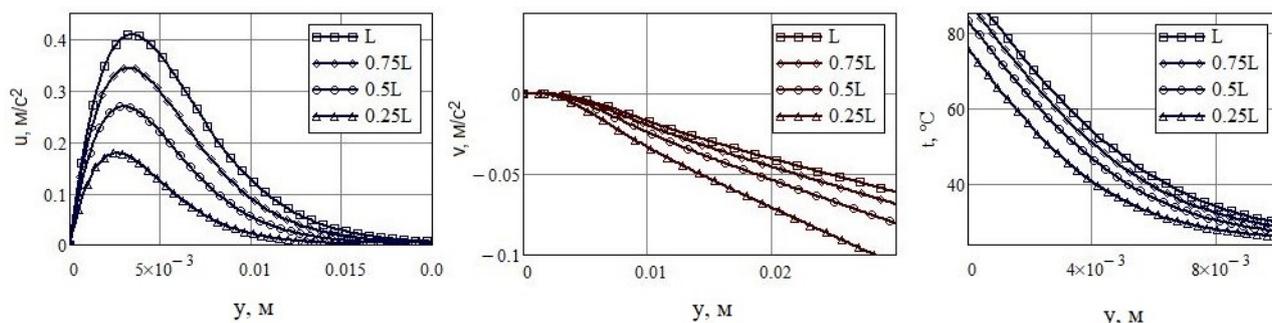


Рисунок 2. Профили компонентов скоростей и температуры

На Рисунке 3 можно видеть распределение температуры на поверхности пластины при варьировании значения теплового потока, подводимого к стенке. При увеличении теплового потока, температура увеличивается.

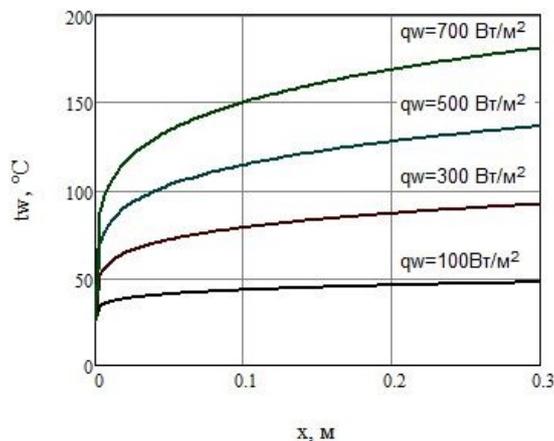


Рисунок 3. Температура стенки

Критериальное уравнение для свободной конвекции около вертикальной пластины при постоянном тепловом потоке было получено Aydin [2]:

$$\frac{Nu_x}{Gr_x^{*1/5}} = 0,630 \left( \frac{Pr^2}{0,67 + Pr} \right)^{1/5}. \quad (3)$$

Сравнение результатов настоящего исследования с зависимостью (3) показано на Рисунке 4. Отклонение зависимости, полученной в настоящей работе, от зависимости Aydin, составляет не более 12%.

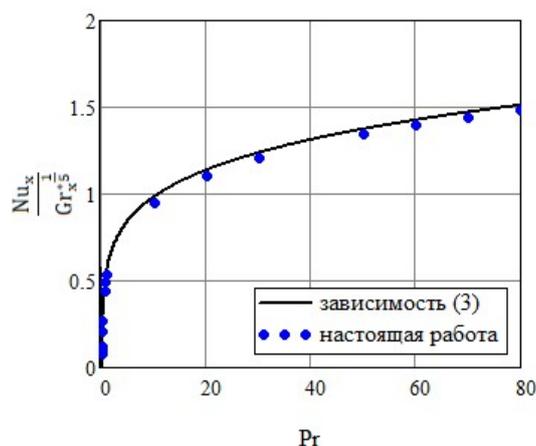


Рисунок 4. Оценка адекватности разработанной программы

В работе выполнено моделирование ламинарного свободно-конвективного течения около вертикальной пластины с постоянным тепловым потоком. Программная реализация выполнена в пакете *Mathcad*. Рассмотрено решение системы дифференциальных уравнений потока в частных производных. Результаты численного моделирования достаточно хорошо согласуются с известными литературными данными.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Numerical simulation on laminar free-convection flow and heat transfer over a vertical plate with constant heat flux / Asish Mitra. – J.Mech.Cont.& Math Science. – 2016. – Vol. 10. – № 2. – P. 1487-1499
2. Aydin O., Guessous L. Fundamental Correlations for Laminar and Turbulent Free Convection from an uniformly Heated Vertical Plate.– Int. Journal of Heat and Mass Transfer 44.– 2001.– pp. 4605-4611.
3. Sparrow, E. M., Gregg, J. L. Similar Solutions for Laminar Free Convection from a Non isothermal Vertical Plate. – Journal of Heat Transfer 80.– 1958.– pp. 379 387.

4. Горбачев М.В., Макаров М.С. Вычислительная математика: численные методы решения задач тепломассообмена: учеб.-метод. Пособие.– Новосибирск: Изд-во НГТУ.– 2018.– 64 с.

### **FREE CONVECTION NEAR VERTICAL PLATE WITH CONSTANT HEAT FLUX**

*Goppe Anastasia*, student, [goppe.2017@stud.nstu.ru](mailto:goppe.2017@stud.nstu.ru)

*Mikhail Lozovsky*, student, [lozovskij.2017@stud.nstu.ru](mailto:lozovskij.2017@stud.nstu.ru)

*Maxim Gorbachev*, Ph.D. (Engineering)

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk,  
K. Marx Ave. 20

A numerical study of free convection near a vertical plate with a constant heat flux is presented in our work. Differential equations are converted into a system of nonlinear equations of the third order. The resulting system is solved in Mathcad. The values of the function  $f(\xi)$  and  $\theta(\xi)$  are obtained. Study data are compared with experimental data published in the literature. Also, velocity and temperature profiles were constructed at a distance of 25, 50, 75, 100% of the length of the plate and the dependence of the wall temperature on the length of the plate.

*Keywords*: constant heat flux, free convection, Mathcad, numerical simulation, vertical plate.

**УДК 536.252**

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ ОКОЛО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПЕРВОГО И ВТОРОГО РОДА**

*Лозовский Михаил Вячеславович, Гоппе Анастасия Александровна,*

*Горбачев Максим Викторович, к.т.н., доцент*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия,  
г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (383) 346-06-42

*Лозовский М.В.*, email [lozovsk2@bk.ru](mailto:lozovsk2@bk.ru)

*Гоппе А.А.*, e-mail [goppe.55@mail.ru](mailto:goppe.55@mail.ru)

*Горбачев М.В.*, email [m.gorbachev@corp.nstu.ru](mailto:m.gorbachev@corp.nstu.ru)

*Адрес для корреспонденции*: Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

## Аннотация

Настоящая работа посвящена численному исследованию процесса свободно конвективного теплообмена около вертикальной пластины при различных видах тепловых граничных условий. Предполагается, что режим течения воздуха – ламинарный. Решается система дифференциальных уравнений движения, неразрывности и энергии при стационарном режиме и в двумерном приближении. Получены зависимости изменения профилей скоростей и температур по длине вертикальной пластины. Достоверность математической модели подтверждается сравнительным анализом результатов с экспериментальными данными, известными в литературе.

**Ключевые слова:** свободная конвекция; граничные условия; конвективный теплообмен; численное моделирование; критерии подобия; тепловой поток; температура поверхности.

Исследованиям теплообмена при свободной конвекции посвящено достаточно большое количество работ [1] - [4]. Описание процессов и аналитические решения для свободно-конвективного теплообмена около вертикальной пластины конечной длины при тепловых граничных условиях первого рода приведено практически во всех учебниках по теплопередаче и теплообмену. При этом исследования свободной конвекции при граничных условиях второго рода встречаются крайне фрагментарно.

В настоящей работе проводится сравнение параметров потоков воздуха около вертикальной пластины при свободно-конвективном течении при тепловых граничных условиях первого и второго родов.

На рисунке 1 показана расчетная схема задачи. Пластина представляет собой вертикальную стенку длиной  $L$ . Вдали от поверхности температура воздуха постоянна и равна  $T_0$ . Так как температуры поверхности пластины и воздуха различны, то начиная от передней кромки образуются тепловой и гидродинамический пограничные слои, толщина которых монотонно увеличивается.

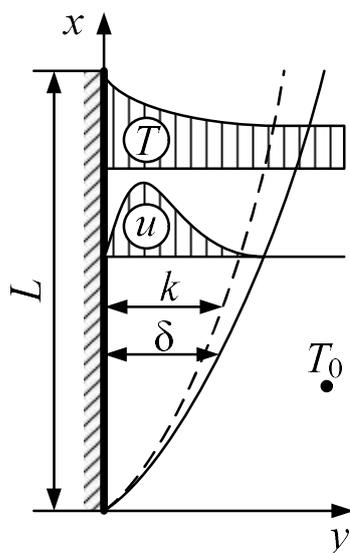


Рисунок 1. Расчетная схема

Система дифференциальных уравнений, описывающая течение около вертикальной пластины в двумерной постановке и при ламинарном режиме течения, включает в себя

– уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} = 0; \quad (1)$$

– уравнение движения:

$$w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + g\beta(T - T_0); \quad (2)$$

– уравнение энергии:

$$w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad (3)$$

где  $w_x$  и  $w_y$  – продольная и поперечная составляющие скорости потока;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;  $\beta = 1/T_0$  – коэффициент объемного расширения;  $g$  – ускорение свободного падения;  $a = \lambda / \rho c_p$  – коэффициент температуропроводности.

При этом граничные условия можно записать в виде:

– при  $y = 0$  и  $x > 0$  (на поверхности пластины):  $w_x = w_y = 0$ ;

Тепловые граничные условия (ГУ) могут быть записаны двумя способами, через:

ГУ 1 рода:  $T = T_w$ ;

ГУ 2 рода:  $-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} = q_w$ ;

– при  $y \rightarrow \infty$  и  $x > 0$  (вдали от поверхности пластины):

$$w_x = w_y = 0, \quad T = T_0.$$

Вводя безразмерные координаты  $w_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}$  и  $w_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$  для компонент скорости, а также безразмерную температуру:

– для ГУ 1 рода:  $\theta = \frac{T - T_0}{T_w - T_0}$ ;

– для ГУ 2 рода:  $\theta = \frac{C_1}{x^{1/5} q_w} (T_0 - T)$ , где  $C_1 = \left( \frac{g\beta q_w}{5\lambda \nu^2} \right)^{1/5}$ ,

система дифференциальных уравнений (1) – (3) примет вид в зависимости от рода тепловых ГУ (см. таблицу).

Таблица

Преобразованные системы дифференциальных уравнений

ГУ первого рода:	ГУ второго рода:
$\frac{d^3 f}{d\eta^3} + 3\eta \frac{d^2 f}{d\eta^2} - 2\left(\frac{df}{d\eta}\right)^2 + \theta = 0;$ $\frac{d^2 \theta}{d\eta^2} + 3\text{Pr}\eta \frac{d\theta}{d\eta} = 0;$	$\frac{d^3 f}{d\eta^3} + 4f \frac{d^2 f}{d\eta^2} - 3\left(\frac{df}{d\eta}\right)^2 - \theta = 0;$ $\frac{d^2 \theta}{d\eta^2} - \text{Pr} \left( 4f \frac{d\theta}{d\eta} + \theta \frac{df}{d\eta} \right) = 0;$
где $\eta = \frac{y}{x} \left( \frac{\text{Gr}_x}{4} \right)^{1/4}$ , $\text{Gr}_x = \frac{g\beta(T_w - T_0)x^3}{\nu^2}$	где $\eta = C_1 \frac{y}{x^{1/5}}$ ; $C_1 = \left( \frac{g\beta q_w}{5\lambda\nu^2} \right)^{1/5}$

где Pr – число Прандтля.

Графические зависимости изменения профиля скорости по длине пластине показано на рисунке 2. Откуда следует, что профиль скорости имеет явно выраженный максимум. Причем, как для граничных условий первого рода, так и второго рода, положение максимума смещается в сторону увеличения поперечной координаты  $y$  по длине пластины.

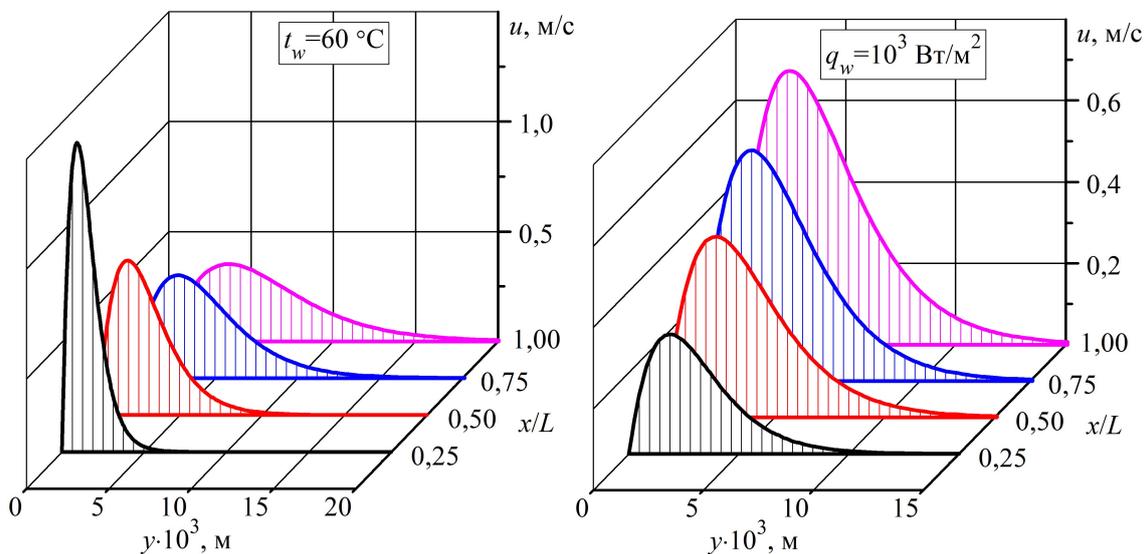


Рисунок 2. Профили скоростей при граничных условиях первого и второго рода

В работе проведено сравнение параметров потоков воздуха около вертикальной пластины при теплообмене в условиях свободной конвекции при граничных условиях первого и второго родов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mitra A. Numerical simulation on laminar free-convection flow and heat transfer over a vertical plate with constant heat flux // J.Mech.Cont. & Math. Sci., 2016, Vol. 10, № 2, pp. 1487-1499.
2. Zeyghami M., Rahman M.M. Analysis of combined natural convection and radiation heat transfer using a similarity solution // Energy Research Journal, 2015, №6 (2), pp. 64-73.

3. Sparrow E.M., Gregg J.L. Similar Solutions for Laminar Free Convection from a Non isothermal Vertical Plate // Trans. ASME, Journal of Heat Transfer, 1958, Vol. 80, pp. 379-387.

4. Molla M.M., Saha S.C., Hossain M.A. Radiation effect on free convection laminar flow along a vertical flat plate with streamwise sinusoidal surface temperature // Math. Comput. Model, 2011, Vol 53, Issues 5-6, 1310-1319.

**SIMULATION OF FREE-CONVECTIVE FLOW NEAR VERTICAL  
PLATE UNDER BOUNDARY CONDITIONS  
OF THE FIRST AND SECOND KIND**

*Lozovsky Mikhail Vyacheslavovich*, student, email lozovsk2@bk.ru

*Goppe Anastasia Alexandrovna*, student, e-mail goppe.55@mail.ru

*Gorbachev Maxim Viktorovich*, Phd. (Technical), email  
m.gorbachev@corp.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk,  
K. Marx Ave. 20, phone (383) 346-06-42

The present work is devoted to numerical research of process of free convective heat exchange near a vertical plate at various kinds of thermal boundary conditions. It is assumed that the air flow regime is laminar. The system of differential equations of motion, continuity and energy at stationary mode and in two-dimensional approximation is solved. The dependences of changes in velocity and temperature profiles along the length of the vertical plate are obtained. The reliability of the mathematical model is confirmed by comparative analysis of results with experimental data known in literature.

*Key words:* free convection; boundary conditions; numerical modeling; similarity criteria; heat flow; surface temperature.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ ОКОЛО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ

*Лозовский Михаил Вячеславович, Гонне Анастасия Александровна,  
Горбачев Максим Викторович, к.т.н., доцент*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия,  
г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

*Лозовский М. В.*, e-mail lozovskij.2017@stud.nstu.ru

*Гонне А. А.*, e-mail goppe.2017@stud.nstu.ru

*Адрес для корреспонденции:*, Новосибирский государственный технический  
университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

### **Аннотация**

Явление свободной конвекции очень распространено в жизни, так как любое нагретое тело, находящееся в условиях естественной среды, отдает свое тепло среде. В данной работе рассматривается вертикальная пластина длиной 0,3 м. Подводимый к ней тепловой поток равен 300 Вт/м<sup>2</sup>. В результате расчета получен график распределения температуры вдоль пластины. Результат показывает, что температура в верхней точке пластины гораздо выше, чем у ее основания.

**Ключевые слова:** свободная конвекция; компьютерный анализ; вертикальная пластина; тепловой поток; естественные условия; воздух.

Задача о развитии свободно-конвективного течения имеет широкий спектр применения в области технических и научных исследований. Практическая реализация свободной конвекции изучена недостаточно широко. В теплообменном оборудовании наблюдается развитие свободно-конвективного пограничного слоя вдоль поверхности нагрева. Практический интерес связан с проблемой адекватного предсказания ламинарного течения при постоянном тепловом потоке.

Цель настоящего исследования – изучить конвективный теплообмен вблизи вертикальной пластины при постоянном тепловом потоке, подводимом к стенке.

Из-за сложности процессов теплообмена при свободной конвекции во многих случаях сложно применить теоретические методы описания и расчета в виду их громоздкости, сложности и в некоторых случаях неосуществимости. Таким образом, для описания и расчета свободно-конвективной теплоотдачи применяются эмпирические критериальные уравнения.

В данной работе рассматривается конвективный теплообмен вблизи вертикальной стенки размером  $L = 0,3$  м при постоянном подводимом потоке равным  $q = 300$  Вт/м<sup>2</sup>. Расчет задачи производится в расчетной среде *Ansys*. На

рисунке 1 приведена расчетная схема, которая представляет собой область размером 0,5х0,3м. Для нижней границы задано входное давление равное атмосферному давлению. Правая граница адиабатная.

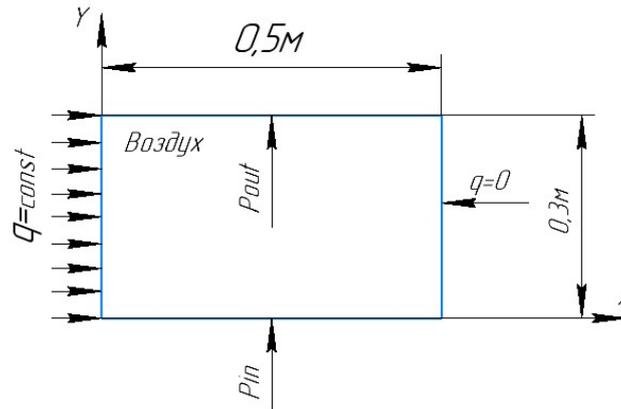


Рисунок 1. Расчетная схема

Система дифференциальных уравнений, описывающая свободную конвекцию около вертикальной пластины, может быть представлена следующим образом:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0,$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + g\beta(T - T_0),$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}.$$

Граничные условия:

$$x = 0, u = v = 0, -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) = q = const,$$

$$x \rightarrow \infty, u = v = 0, T = T_\infty.$$

При решении системы дифференциальных уравнений воздух считается идеальным. Профиль температуры должен монотонно увеличиваться вдоль оси  $y$  из начала координат, поэтому для более точного решения необходимо применить сгущение сетки к началу координат.

Для этого, после построения геометрии, в сеточном генераторе Meshing строим сетку. У всех границ объема необходимо изменить размер элемента на 0,002м и задать сгущение к началу координат. После чего применить тип сетки: FaceMeshing, для равномерности сетки. Сетка представлена на Рисунках 2, 3.

Для решения задачи использовался Fluent 19.2. Процесс теплообмена стационарный, режим течения жидкости ламинарный, температура воздуха вдали от пластины постоянна, физические параметры воздуха (исключая плотность) постоянны; плотность является функцией температуры. Уравнения свободной конвекции решаются с помощью метода SIMPLE.

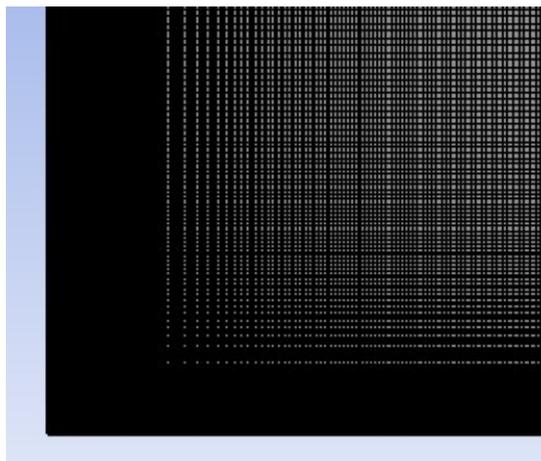


Рисунок 2. Сетка со сгущением



Рисунок 3. Сетка со сгущением (2:1)

В результате расчета были получены график распределения температур вдоль нагревательной поверхности, профиль скорости вдоль пластины, контур распределения температур в расчетной области. Полученные данные хорошо согласуются с данными Sebiha Yıldız.

#### Список литературы

1. Investigation of natural convection heat transfer at constant heat flux along a vertical and inclined plate / Sebiha Yıldız. – Journal of Thermal Engineering. – 2018. – Vol. 4. – № 6. – P. 2432-2444.
2. Investigation of Natural Convection Heat Transfer Along a Uniformly Heated Vertical Plate / Sebiha Yıldız1 Burak Başaran1. – Arabian Journal for Science and Engineering. – 2019. – P. 1685–1696.
3. Numerical simulation on laminar free-convection flow and heat transfer over a vertical plate with constant heat flux / Asish Mitra. – J.Mech.Cont.& Math Science. – 2016. – Vol. 10. – № 2. – P. 1487-1499.
4. Aydın O., Guessous L. Fundamental Correlations for Laminar and Turbulent Free Convection from an uniformly Heated Vertical Plate.– Int. Journal of Heat and Mass Transfer 44.– 2001.– pp. 4605-4611.

#### NUMERICAL SIMULATION OF FREE CONVECTION NEAR A VERTICAL PLATE

*Goppe Anastasia*, student, [goppe.2017@stud.nstu.ru](mailto:goppe.2017@stud.nstu.ru);  
*Mikhail Lozovsky*, student, [lozovskij.2017@stud.nstu.ru](mailto:lozovskij.2017@stud.nstu.ru);  
*Maxim Gorbachev*, Ph.D. (Engineering)  
 Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia,  
 Novosibirsk, Pr. 20 Karl Marks,20

The phenomenon of free convection is very common in life, as any heated body in the natural environment gives its heat to the environment. In this paper we consider a 0.3 m long vertical plate. The heat Flux that is brought to it is  $300\text{W}/\text{m}^2$ . The calculation results in a graph of temperature distribution along the plate. The result shows that the temperature at the top point of the plate is much higher than at the base.

*Keywords:* air; free convection; vertical plate; heat Flux; natural conditions; computer analysis.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО КОНДИЦИОНЕРА ДЛЯ АДМИНИСТРАТИВНОГО ЗДАНИЯ

*Мелехов Максим Игоревич*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия,  
г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (913)005-48-19

*Мелехов М.И.*, email [melexov1997@yandex.ru](mailto:melexov1997@yandex.ru)

*Адрес для корреспонденции: Новосибирский государственный технический  
университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20,  
тел. (913)005-48-19*

### Аннотация

В данной статье рассматривается расчёт тепло- и влагопритоков в помещения в тёплый и холодный период года, на основании которых определяется требуемый расход воздуха в помещения. Подбирается центральный кондиционер и рассчитываются его основные блоки, предназначенного для административного здания.

**Ключевые слова:** температура, влажность, кондиционер, воздух, теплоприток, влагоприток, воздухонагреватель, воздухоохладитель.

Для обеспечения комфортных условий труда работников необходимо поддерживать оптимальные параметры воздуха в помещении, такие как температура, влажность, скорость движения, газовый состав, наличие механических частиц пыли. Микроклимат помещения, в котором человек находится долго, играет существенную роль в формировании иммунитета, работоспособности, возможности комфортно отдохнуть и расслабиться. Состояние внутренней среды здания может не только плодотворно влиять на здоровье человека, но и оказывать негативное воздействие. Таким образом, чем дольше мы пребываем в неветилируемом помещении, тем сильнее это сказывается на работе нашего организма.

Комфортные параметры воздуха по температуре и влажности в тёплый и холодный периоды года в соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями представлены в Таблице 1.

Таблица 1

Комфортные параметры воздуха в помещении

Период года	Температура, С	Влажность, %
Тёплый	20 - 24	30-60
Холодный	18-22	30-45

Сложность поддержания постоянными параметров воздуха в помещениях обуславливается частыми изменениями внешних факторов, таких как изменение количества людей, погодные условия, использование электроприборов и др. Поэтому система кондиционирования должна «подстраиваться» под изменения, удалять и подавать необходимое в данный момент количество воздуха с требуемыми параметрами.

Параметры наружного воздуха для теплого и холодного периода года подбираются по СНиП 23-01-99 “Строительная климатология” для города, в котором проектируется система кондиционирования воздуха и берётся как средняя максимальная и средняя минимальная температура и влажность самого теплого и холодного месяца соответственно.

#### **Методы и подходы**

Для выбора типоразмера КЦКП требуется определение тепло и влагопритоков в помещения здания и требуемый расход воздуха.

Тепло и влагопритоки в помещения:

Теплопритоки в помещения в тёплый период года определяются как сумма теплопритоков через наружные ограждения ( $Q_1$ ), теплопритоки от солнечной радиации ( $Q_2$ ), теплопритоки от людей в помещениях ( $Q_3$ ):

$$Q_{\text{п}} = Q_1 + Q_2 + Q_3.$$

Теплопритоки в холодный период года определяются как теплопотери через наружные ограждения теплопритоки от солнечной радиации, теплопритоки от людей в помещениях:

$$Q_{\text{п}} = -Q_1 + Q_2 + Q_3.$$

Влагопритоки в помещения определяются как сумма влагопритоков от людей ( $W_1$ ) и влагопритоков с открытой поверхности воды ( $W_2$ ):

$$W = W_1 + W_2.$$

В результате расчётов был выбран типоразмер кондиционера КЦКП-100-УЗ и рассчитаны блоки для холодного периода года:

- воздушный фильтр;
- первый и второй воздухонагреватель;
- камера орошения;
- вентиляторный агрегат;

для тёплого периода года

- воздушный фильтр;
- второй воздухонагреватель;
- воздухоохладитель;
- камера орошения;
- вентиляторный агрегат.

## **Результаты**

Подбираются блоки для КЦКП таким образом, чтобы они смогли обеспечивать требуемые параметры воздуха в помещениях административного здания в зависимости от времени года:

- фильтр и вентиляторный агрегат подбираются вне зависимости от времени года по каталогу;

- первый воздухоподогреватель подбирается для холодного периода года, в тёплый период он отключен, так как поступаемый воздух в блок кондиционера достаточно тёплый;

- воздухоохладитель подбирается для теплого периода года, для холодного периода он отключён, так как поступаемый воздух в блок кондиционера достаточно холодный;

- камера орошения подбирается для холодного периода года, так как в этот период года воздух максимально сухой и его необходимо увлажнять;

- второй воздухоподогреватель рассчитывается для холодного периода года, так как в этот период максимальная нагрузка на этот блок.

Выбранный КЦКП-100-УЗ обеспечивает комфортные параметры воздуха в помещениях административного здания с минимальными отклонениями от рекомендованных комфортных параметров воздуха. Методика расчёта проста и универсальна для большинства систем кондиционирования, позволяет быстро и легко посчитать и подобрать блоки КЦКП.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Комаров Е. А., Ширяева Н. П., Симонов Д. С. Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Оптимизация микроклимата помещений» для студентов всех форм обучения специальности 270109 – Теплогазоснабжение и вентиляция.

2. Липа А.И. Кондиционирование воздуха. Основы теории. Современные технологии обработки воздуха. – Одесса: Изд-во ВМВ, 2010.

3. Белова Е. М. Центральные системы кондиционирования воздуха в зданиях – М.: Евроклимат, 2006 – 640 с.: ил – (Библиотека климатотехника)

## **STUDY OF THE CENTRAL AIR CONDITIONER FOR THE ADMINISTRATIVE BUILDING**

*Melekhov Maxim Igorevich, email melexov1997@yandex.ru  
Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk,  
K. Marx Ave. 20, phone 8 (913)005-48-19*

This article deals with the calculation of heat and moisture inflows into rooms during the warm and cold period of the year, on the basis of which the required air flow into rooms is determined. A central air conditioner is selected and its main units are calculated, intended for the administrative building.

*Key words:* temperature; humidity; conditioner; air; heat supply; moisture supply; air heater; air cooler.

УДК 629.7.048.7 (075.8)

## **ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ОРЕБРЕНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕННИКА-КОНДЕНСАТОРА СКВ**

*Тюескин Валерий Александрович, студент; Коротаяева Валерия Александровна, студентка; Чичиндаев Александр Васильевич, д.т.н., профессор*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. 346-06-42

*Чичиндаев А.В., e-mail: ttf\_nstu@rambler.ru*

Адрес для корреспонденции: Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

В данной работе рассматриваются варианты выбора теплообменника-конденсатора для различных значений шага оребрений по холодному и горячему тракту и проведено сравнение температур стенок теплообменника для выявления зон обмерзания. В заключении приведены результаты сравнения распределения температуры по пластине для вариантов с изменением шага холодного, горячего или обоих оребрений.

*Ключевые слова:* теплообменник-конденсатор, обмерзание, теплопередающая поверхность, противообледенительные системы.

Одним из методов предотвращения обмерзания теплообменника-конденсатора является метод оптимизации его конструкции, используя который можно бороться с причиной возникновения обмерзания - отрицательной температурой поверхности пластины [1-4]. Данный метод оптимизации представляет собой изменение шага оребрения между пластинами в холодном и горячем тракте.

Целью данной работы является сравнительный анализ распределения температур по поверхности теплообменников-конденсаторов при переменном холодном, горячем или обоих оребрениях.

### **Вариант 1. Переменное оребрение по холодному тракту.**

В результате анализа распределений температур теплообменной поверхности установлено, что перепад температуры находится в диапазоне 25...29 °С, при уменьшении шага холодного оребрения минимальные температуры поверхности повышаются от - 3 °С до 0 °С. В последнем случае отсутствуют отрицательные температуры поверхности (см. Рисунок 1).

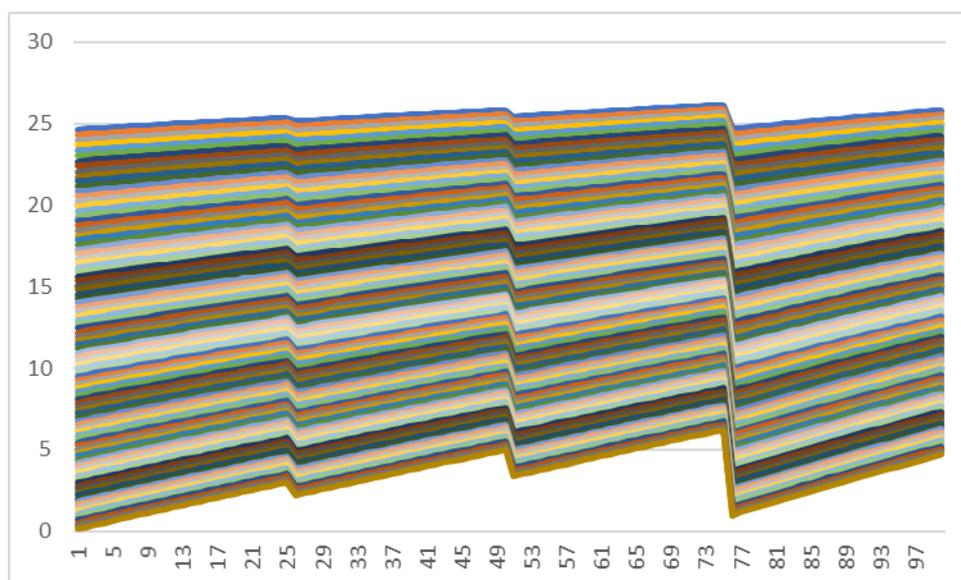


Рисунок 1. Переменное оребрение по холодному тракту ( $Re_x=2500$ ,  $Re_r=2500$ )

### Вариант 2. Переменное оребрение по горячему тракту.

В результате анализа распределений температур теплообменной поверхности установлено, что перепад температуры находится в диапазоне 44...47 °С, при уменьшении шага горячего оребрения минимальные температуры поверхности повышаются от -20 °С до -18 °С. Во всех случаях наблюдается значительное обмерзание поверхности (26...30%) (см. Рисунок 2).

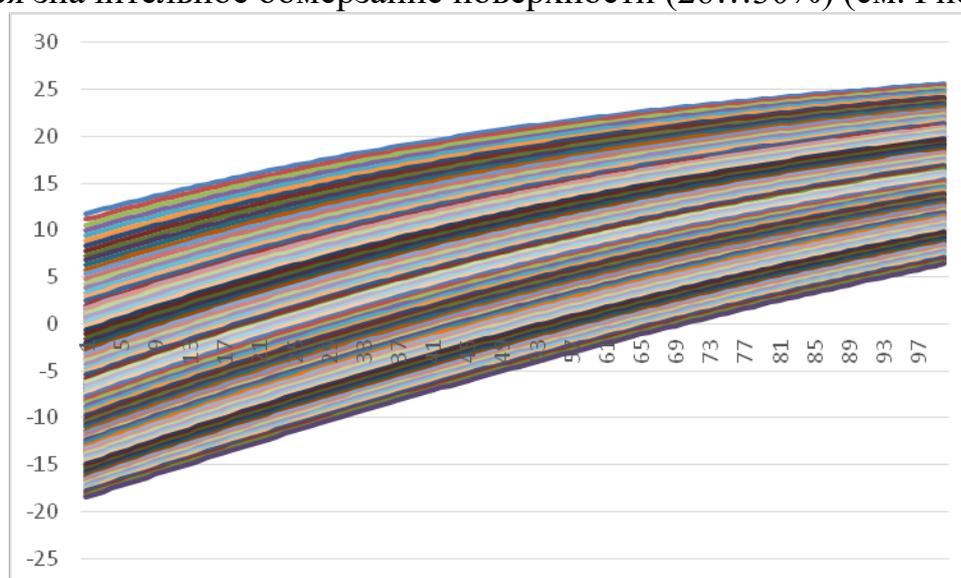


Рисунок 2. Переменное оребрение по горячему тракту ( $Re_x=2500$ ,  $Re_r=2500$ )

### Вариант 3. Переменное оребрение по обоим трактам.

В результате анализа распределений температур теплообменной поверхности установлено, что перепад температуры находится в диапазоне 26...29 °С, при изменении шага обоих оребрений минимальные температуры

поверхности повышаются от  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В последнем случае наблюдается незначительное обмерзание поверхности (0,33%) (Рисунок 3).

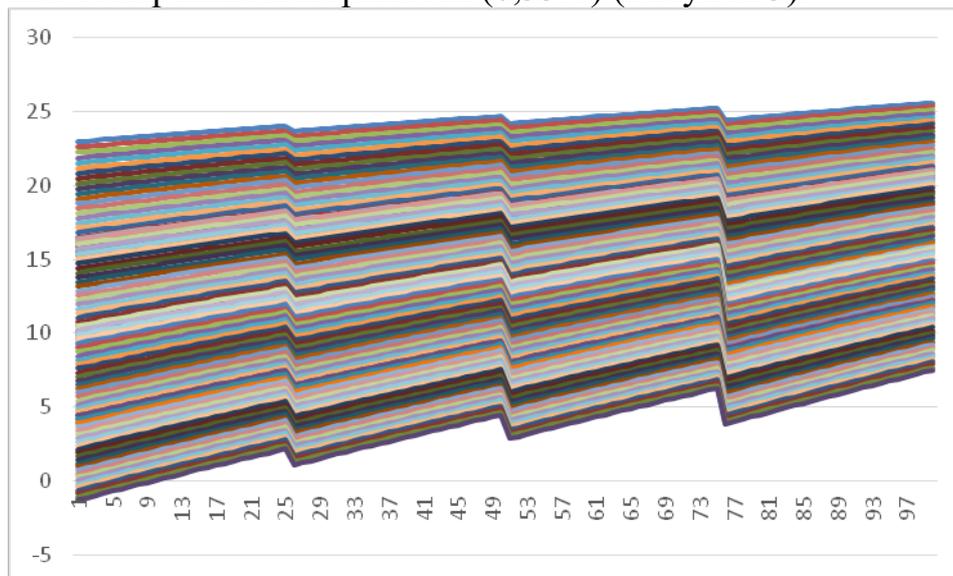


Рисунок 3. Переменное оребрение по обоим трактам ( $Re_x=2500$ ,  $Re_r=2500$ )

В работе представлены результаты расчета теплообменников-конденсаторов с различными вариантами изменения шага оребрений. Вариант с переменным оребрением по обоим трактам сокращает перепад температуры поверхности на  $1...2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , по сравнению с переменным оребрением по холодному тракту. Также уменьшается площадь обмерзания поверхности при уменьшении начального шага оребрения. В то же время, вариант с переменным горячим оребрением не дает каких-либо значимых результатов и площадь обмерзания остается по-прежнему высокой.

Результаты работы представляют практический интерес при проектировании теплообменного оборудования, работающего на влажном воздухе при отрицательных температурах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чичиндаев А.В. Тепломассообмен влажного воздуха в компактных пластинчато-ребристых теплообменниках : монография / А.В. Чичиндаев. – Новосибирск : изд-во НГТУ, 2012. - 298 с.
2. Чичиндаев А.В. Оптимизация компактных пластинчато-ребристых теплообменников. Теоретические основы: учебное пособие / А.В. Чичиндаев. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2017. – 436 с.
3. Чичиндаев А.В. Исследование влияния переменного отношения термических сопротивлений на поля температур в теплообменнике-конденсаторе СКВ / А. В. Чичиндаев // Энергетика и теплотехника: сб. науч. трудов / под ред. акад. РАН В. Е. Накорякова. – Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2015. – Вып. 19. – С. 181-187.

4. Системы жизнеобеспечения и оборудование летательных аппаратов: учебное пособие / А. В. Чичиндаев, Ю. В. Дьяченко, В. А. Спарин, И. В. Хромова; под ред. А.В. Чичиндаева. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 319 с.

## **INFLUENCE OF CHANNEL GEOMETRY ON THE SURFACE TEMPERATURE OF HEAT EXCHANGER-CONDENSER ACS**

*Toeskin Valeriy Aleksandrovich*, student,  
*Korotaeva Valeriya Aleksandrovna*, student,  
*Chichindaev Aleksander Vasilevich*, Doctor of Sci., Prof.  
e-mail: ttf\_nstu@rambler.ru

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk,  
630073, Russia

The article discusses the options for choosing a heat exchanger-condenser for different values of the pitch of the fins along the cold and hot paths and compares the temperatures of the walls of the heat exchanger to identify freezing zones. Further in the conclusion, the results of a comparison of the temperature distribution over the plate are given for variants with a change in the pitch of cold, hot, or both ribs.

*Keywords:* exchanger-condenser; freezing; heat transfer surface-icing system.

**УДК 629.7.048.7 (075.8)**

## **ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕННИКА-КОНДЕНСАТОРА СКВ**

*Тоескин Валерий Александрович, студент; Дьяченко Юрий Васильевич, д.т.н., профессор*

*Чичиндаев Александр Васильевич, д.т.н., профессор, e-mail: ttf\_nstu@rambler.ru*  
Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия,  
г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. 346-06-42

*Адрес для корреспонденции:* Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

### **Аннотация**

В данной работе рассматриваются варианты выбора теплообменника-конденсатора для различных значений влагосодержания и проведено сравнение температур стенок теплообменника для выявления зон промерзания. В

заклучении приведены результаты сравнения распределения температуры по пластине для вариантов с переменными влагосодержанием.

**Ключевые слова:** теплообменник-конденсатор, обмерзание, теплопередающая поверхность, противообледенительные системы.

Одним из методов предотвращения обмерзания теплообменника-конденсатора является метод оптимизации его конструкции, используя который можно бороться с причиной возникновения обмерзания - отрицательной температурой поверхности пластины [1-4]. Данный метод оптимизации представляет собой изменение значений влагосодержания.

Целью представленной работы является сравнительный анализ распределения температур по поверхности теплообменников-конденсаторов при переменном влагосодержании.

#### **Вариант 1. Влагосодержание равно нулю по обоим трактам.**

В результате анализа распределений температур теплообменной поверхности установлено, что средний перепад температуры составляет 47 °С, минимальные температуры поверхности составляют около -20 °С. В данном случае доля поверхности теплообменника-конденсатора с отрицательной температурой составляет 29,6% (Рисунок 1).

#### **Вариант 2. Влагосодержание одинаковое по обоим трактам (10 г/кг).**

В результате анализа распределений температур теплообменной поверхности установлено, что средний перепад температуры составляет 36 °С, минимальные температуры поверхности составляют около -11 °С. В данном случае также наблюдается обмерзание поверхности, но происходит ее уменьшение до 26,2% (Рисунок 2).

#### **Вариант 3. Влагосодержание различное по обоим трактам (30 г/кг – для горячего тракта, 10 г/кг – для холодного тракта).**

В результате анализа распределений температур теплообменной поверхности установлено, что средний перепад температуры составляет 34 °С, минимальные температуры поверхности составляют около -8 °С. В данном случае наблюдается дальнейшее уменьшение площади обмерзания до 20,4% (Рисунок 3).

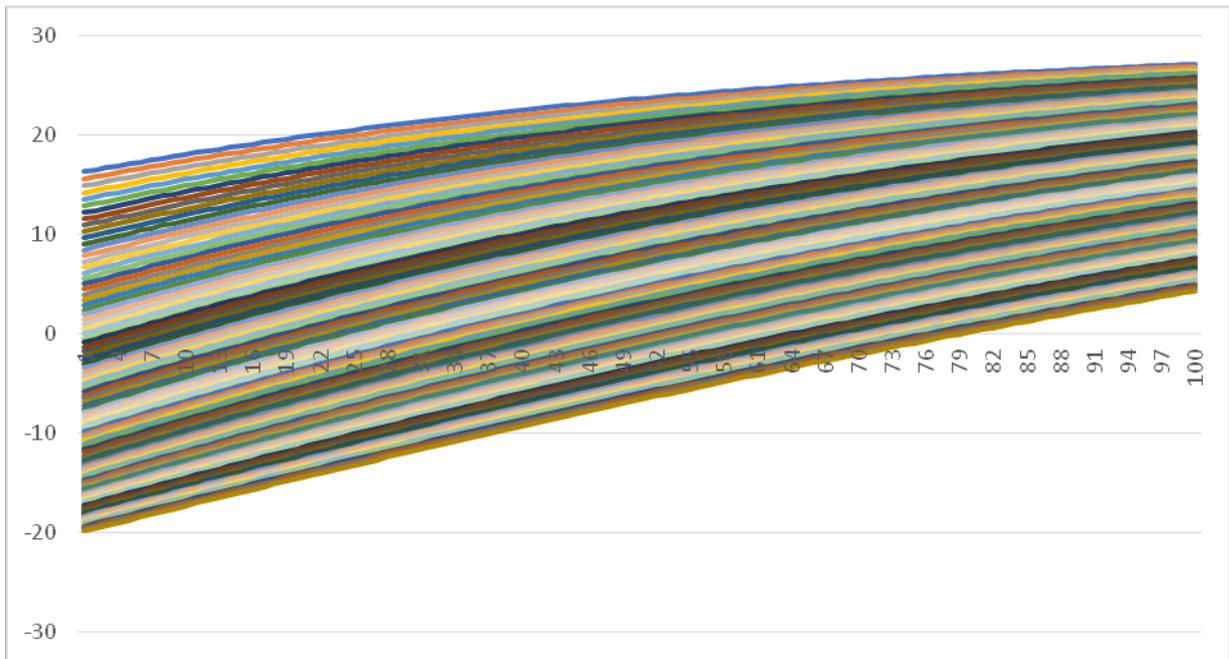


Рисунок 1. Влажесодержание отсутствует по обоим трактам ( $Re_x=2500$ ,  $Re_\tau=2500$ )

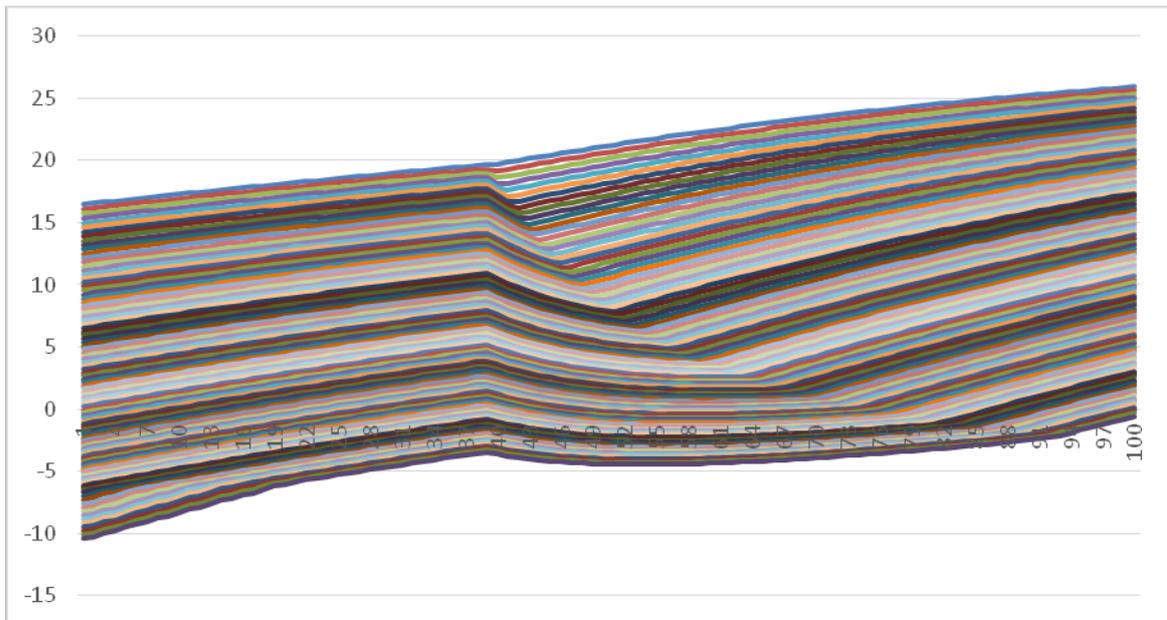


Рисунок 2. Одинаковое влажесодержание по обоим трактам ( $Re_x=2500$ ,  $Re_\tau=2500$ )

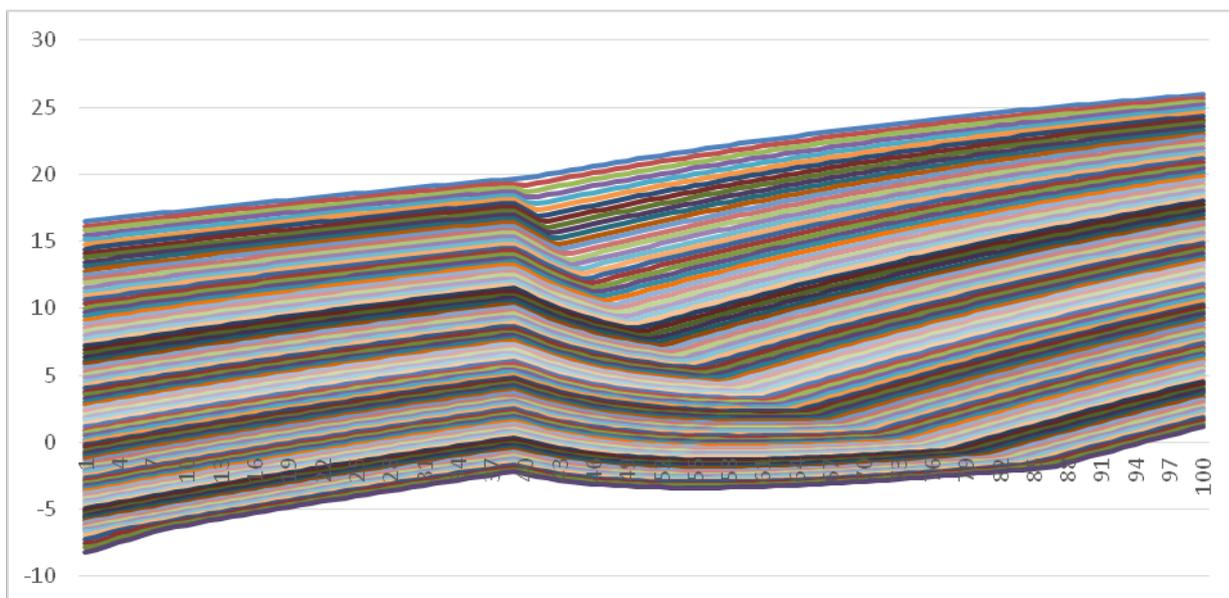


Рисунок 3. Различное влагосодержание по обоим трактам ( $Re_x=2500$ ,  $Re_r=2500$ )

В работе представлены расчеты КПРТ при наличии тепломассообмена в горячем и холодном трактах. В результате установлено, что при увеличении влагосодержания по обоим трактам уменьшается перепад температур на поверхности теплообмена, а также увеличивается минимальная температура поверхности, что приводит к уменьшению площади обмерзания поверхности КПРТ. Анализируя графики также видно, что повышение влагосодержания по горячему тракту увеличивает температуру поверхности средней части теплообменника ближе к околонулевым температурам.

Результаты работы представляют практический интерес при проектировании теплообменного оборудования, работающего на влажном воздухе при отрицательных температурах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чичиндаев А.В.** Тепломассообмен влажного воздуха в компактных пластинчато-ребристых теплообменниках : монография / А.В. Чичиндаев. – Новосибирск : изд-во НГТУ, 2012. - 298 с.
2. **Чичиндаев А.В.** Оптимизация компактных пластинчато-ребристых теплообменников. Теоретические основы: учебное пособие / А.В. Чичиндаев. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2017. – 436 с.
3. **Дьяченко Ю.В.** Особенности работы авиационных систем кондиционирования на влажном воздухе : учеб. пособие для вузов / Ю. В. Дьяченко, А. В. Чичиндаев ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. - 87 с.

4. Системы жизнеобеспечения и оборудование летательных аппаратов: учебное пособие / А. В. Чичиндаев, Ю. В. Дьяченко, В. А. Спарин, И. В. Хромова; под ред. А.В. Чичиндаева. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 319 с.

## **INFLUENCE OF VARIABLE MOISTURE CONTENT ON THE SURFACE TEMPERATURE OF HEAT EXCHANGER-CONDENSER ACS**

*Toeskin Valeriy Aleksandrovich*, student,  
*Dyachenko Yuriy Vasilevich*, Doctor of Sci., Prof.  
*Chichindaev Aleksander Vasilevich*, Doctor of Sci., Prof.  
*e-mail: ttf\_nstu@rambler.ru*  
Novosibirsk State Technical University,  
20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia

The article discusses the options for choosing a heat exchanger-condenser for different values of moisture content and compares the temperatures of the heat exchanger walls to identify freezing zones. Further in the conclusion, the results of a comparison of the temperature distribution over the plate for variants with variable moisture content are given.

*Keywords:* exchanger-condenser; freezing; heat transfer surface-icing system.

**УДК 629.7.048.7 (075.8)**

## **ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ОРЕБРЕНИЯ И ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕННИКА-КОНДЕНСАТОРА СКВ**

*Тоескин Валерий Александрович*, студент; *Саливанчук Роман Сергеевич*, студент; *Чичиндаев Александр Васильевич*, д.т.н., профессор  
Новосибирский государственный технический университет, 630073,  
Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. 346-06-42  
*Чичиндаев А.В.*, *e-mail: ttf\_nstu@rambler.ru*

Адрес для корреспонденции: Новосибирский государственный  
технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса,  
20

### **Аннотация**

В данной работе рассматриваются варианты выбора теплообменника-конденсатора с переменным шагом оребрений по холодному и горячему тракту с учетом влагосодержания, проведено сравнение температур стенок

теплообменника для выявления зон обмерзания. В заключении приведены результаты сравнения распределения температуры по пластине для вариантов с изменением обоих оребрений и учетом влагосодержания.

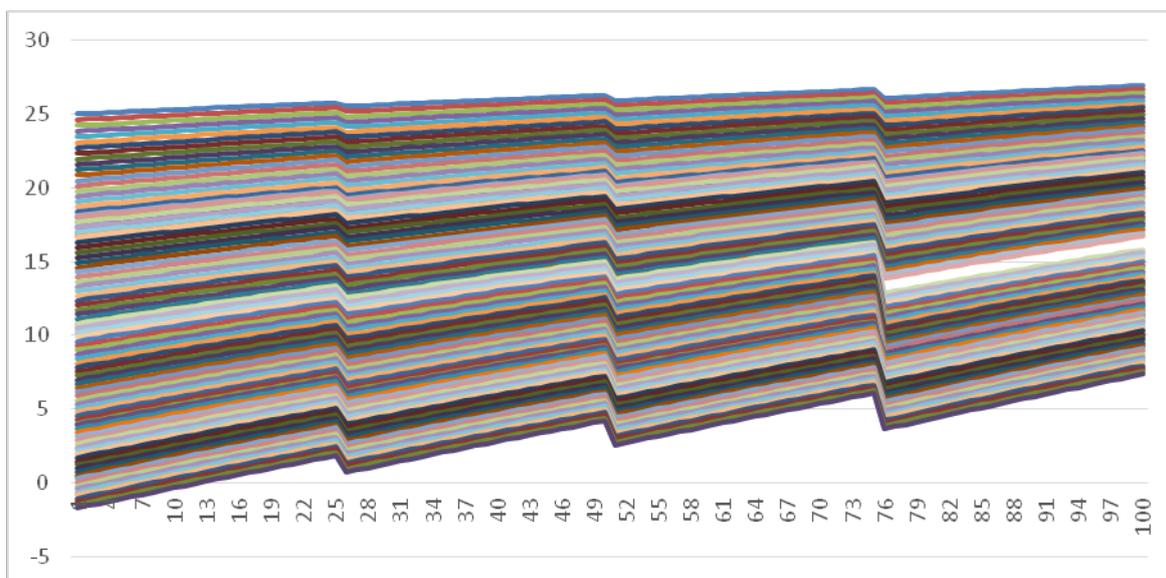
**Ключевые слова:** теплообменник-конденсатор, обмерзание, теплопередающая поверхность, противообледенительные системы.

Одним из методов предотвращения обмерзания теплообменника-конденсатора является метод оптимизации его конструкции, используя который можно бороться с причиной возникновения обмерзания - отрицательной температурой поверхности пластины [1-4]. Данный метод оптимизации представляет собой изменение шага оребрения между пластинами с учетом влагосодержания.

Целью представленной работы является сравнительный анализ распределения температур по поверхности теплообменников-конденсаторов при переменном холодном и горячем оребрении и учетом влагосодержания.

### **Вариант 1. Переменное оребрение по обоим трактам с нулевым влагосодержанием.**

В результате анализа распределений температур теплообменной поверхности установлено, что средний перепад температуры составляет 29 °С, минимальные температуры поверхности составляют около -2 °С. В данном случае наблюдается незначительное обмерзание поверхности (0,55%) (Рисунок 1).



*Рисунок 1.* Переменное оребрение по обоим трактам с нулевым влагосодержанием ( $Re_l=2500$ ,  $Re_x=2500$ )

### **Вариант 2. Переменное оребрение по обоим трактам с учетом влагосодержания (20 г/кг – для горячего тракта, 5 г/кг – для холодного тракта).**

Для данного расчета будем использовать то же оребрение, которое использовалось в предыдущем случае. В результате анализа распределений

температур теплообменной поверхности установлено, что средний перепад температуры составляет 19 °С, минимальные температуры поверхности составляют около 4 °С. В данном случае отсутствуют отрицательные температуры поверхности (Рисунок 2).

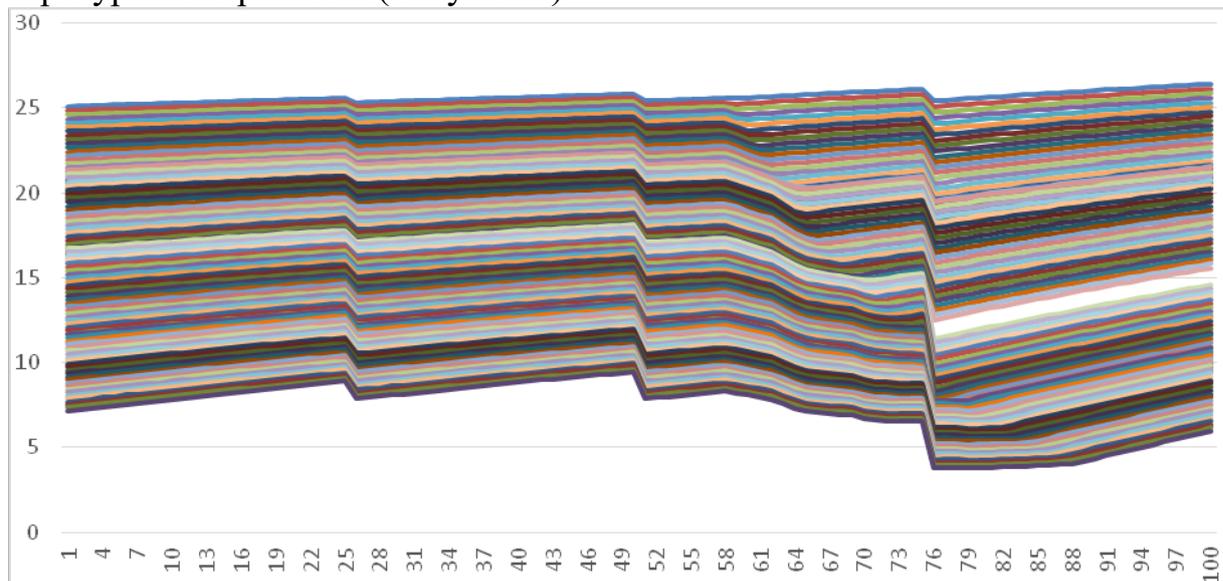


Рисунок 2. Переменное оребрение по обоим трактам с учетом влагосодержания ( $Re_{г}=2500$ ,  $Re_{х}=2500$ )

В работе представлены расчеты КПРТ с переменным шагом обоих оребрений и учетом влагосодержания. Это приводит к тому, что появляется тепломассообмен в горячем и холодном трактах. В результате был обнаружен дополнительный эффект: увеличилась температура входных сечений I-III по ходу холодного тракта. Фактически они начали работать как «тепловой нож» противообледенительной системы, расплавляя переохлажденную влагу и снег. Также было обнаружено, что при учете влагосодержания средняя температура поверхности увеличивается на 1-2 °С, а средний перепад температур уменьшается на 9-10 °С.

Результаты работы представляют практический интерес при проектировании теплообменного оборудования, работающего на влажном воздухе при отрицательных температурах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чичиндаев А.В. Тепломассообмен влажного воздуха в компактных пластинчато-ребристых теплообменниках : монография / А.В. Чичиндаев. – Новосибирск : изд-во НГТУ, 2012. - 298 с.
2. Чичиндаев А.В. Оптимизация компактных пластинчато-ребристых теплообменников. Теоретические основы: учебное пособие / А.В. Чичиндаев. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2017. – 436 с.
3. Дьяченко Ю.В. Особенности работы авиационных систем кондиционирования на влажном воздухе : учеб. пособие для вузов / Ю. В.

Дьяченко, А. В. Чичиндаев ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. - 87 с.

4. Системы жизнеобеспечения и оборудование летательных аппаратов: учебное пособие / А. В. Чичиндаев, Ю. В. Дьяченко, В. А. Спарин, И. В. Хромова; под ред. А.В. Чичиндаева. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 319 с.

## **INFLUENCE OF CHANNEL GEOMETRY AND MOISTURE CONTENT ON THE SURFACE TEMPERATURE OF HEAT EXCHANGER-CONDENSER ACS**

*Toeskin Valeriy Aleksandrovich*, student,  
*Salivanchuk Roman Sergeevich*, student,  
*Chichindaev Aleksander Vasilevich*, Doctor of Sci., Prof.  
*e-mail: ttf\_nstu@rambler.ru*  
Novosibirsk State Technical University,  
20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia

The article discusses the options for choosing a heat exchanger-condenser with a variable pitch of fins along the cold and hot paths, taking into account the moisture content, and compares the temperatures of the heat exchanger walls to identify freezing zones. Further in the conclusion, the results of a comparison of the temperature distribution over the plate are given for variants with a change in both ribs and taking into account the moisture content.

*Keywords:* exchanger-condenser; freezing; heat transfer surface-icing system.

**УДК 629.7.048**

## **СИСТЕМА ТЕРМОРЕГУЛЯЦИИ ЧЕЛОВЕКА: ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МЕХАНИЗМОВ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР**

*Чушкина Елизавета Петровна, студент; Хромова Ирина Владимировна, к.т.н., доцент*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. +7(913)782-05-50

*Чушкина Е.П.*, e-mail: [chushkina\\_2000@mail.ru](mailto:chushkina_2000@mail.ru)

*Хромова И.В.*, email [xromova@corp.nstu.ru](mailto:xromova@corp.nstu.ru)

Адрес для корреспонденции: Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

## Аннотация

В работе представлена методика расчета тепловых процессов в системе «человек – тепловая защита – окружающая среда» в условиях низких температур с учетом внутренних источников и переноса тепла между расчетными элементами и слоями. Описана схема совместной работы кровеносной системы и системы термостабилизации человека, которая позволяет рассчитывать массовый расход теплоносителя (крови) на расчетные элементы. Исследовано влияние переноса тепла с током теплоносителя между расчетными элементами и слоями на тепловые процессы в системе «человек – тепловая защита – окружающая среда». Анализ получаемых результатов позволяет качественно и количественно оценить влияние перераспределения теплоносителя между «ядром» и «оболочкой» системы терморегуляции человека. Результаты исследования могут быть полезны специалистам при проектировании систем жизнеобеспечения летательных аппаратов.

**Ключевые слова:** системы жизнеобеспечения, процессы тепломассообмена, теплоноситель, термическое сопротивление, тепловые потери, низкие температуры.

Моделирование биофизических процессов на сегодняшний день является актуальной задачей в области разработки и оптимизации элементов систем жизнеобеспечения, направленных на обеспечение теплового комфорта для человека в рамках системы «человек – тепловая защита – окружающая среда» и для разработки соответствующих средств защиты.

Целью настоящей работы является исследование механизмов работы системы терморегуляции человека (СТР) в широком диапазоне параметров окружающей среды.

В работе проведен анализ принципов работы афферентного звена и исполнительных механизмов СТР (Рисунок 1).

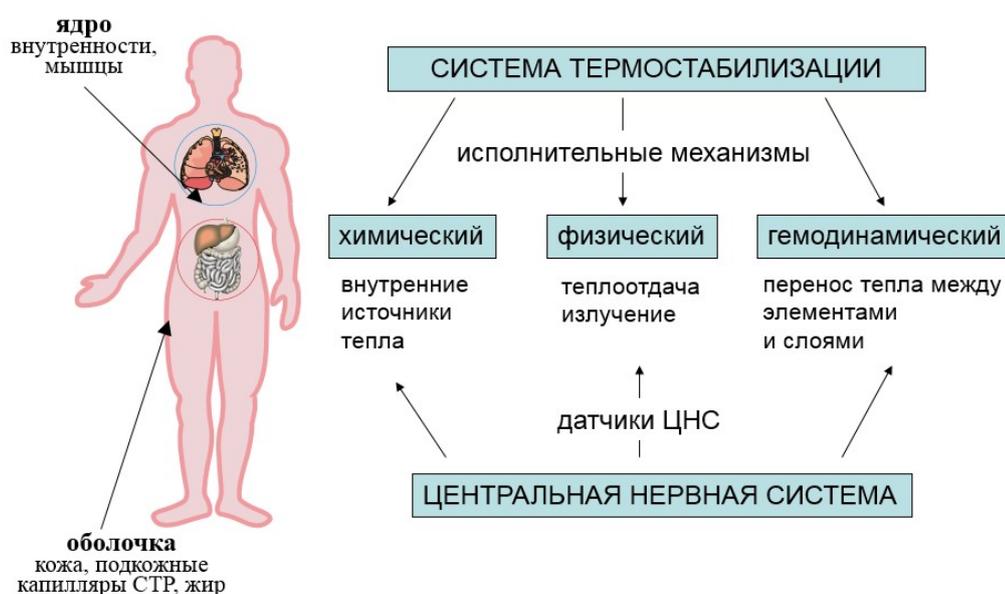


Рисунок 1. Исполнительные механизмы системы терморегуляции человека

Для моделирования работы системы термостабилизации человека применяется относительное деление объекта на «оболочку» – покровные ткани тела и «ядро» – внутренние органы и мышцы. Это многослойная многоэлементная модель, в которой каждая часть тела представлена расчетным элементом с соответствующим количеством и видом слоев. Кровеносная система работает совместно с системой терморегуляции и осуществляет перенос тепла от внутренних органов к поверхности тела (Рисунок 2).

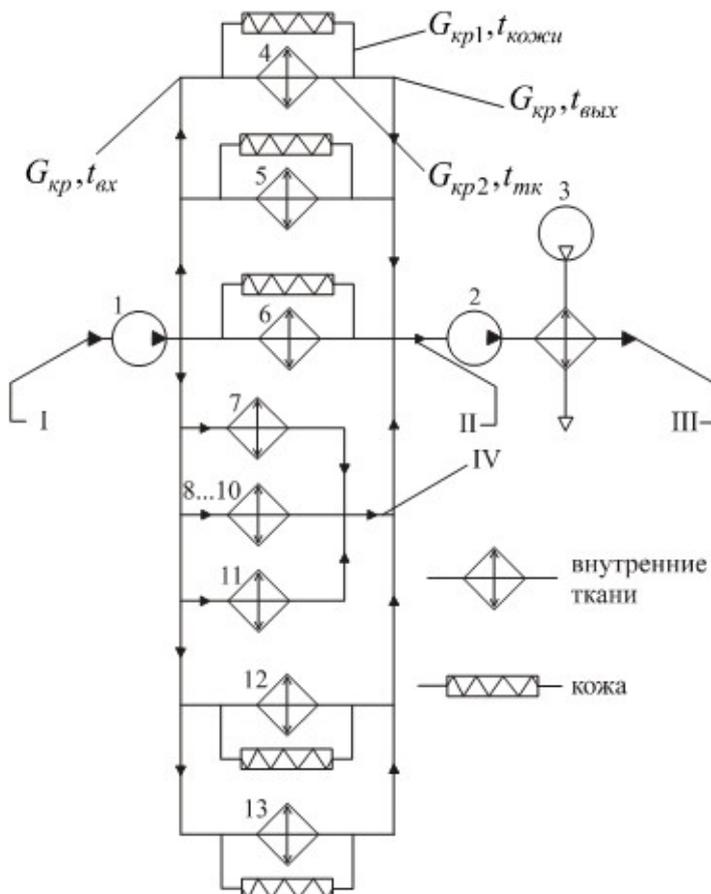


Рисунок 2. Условно-гидравлическая схема: I – вход теплоносителя в первый контур; II – выход теплоносителя из первого контура; III – выход из второго контура; IV – выход теплоносителя из внутреннего слоя ядра; 1, 2 – насос (сердце); расчетные элементы: 3 – легкие; 4 – голова; 5 – руки; 6 – мышцы грудной клетки; 7 – мышцы миокарда; 8...10 – органы пищеварения; 11 – почки; 12 – мышцы нижней половины туловища; 13 – ноги

Предложенный подход позволяет рассчитать расход теплоносителя на расчетные элементы и оценить влияние переноса тепла между расчетными элементами и слоями на тепловые процессы в системе «человек – тепловая защита – окружающая среда». В частности, проводятся исследования влияния температуры, давления и скорости среды (Рисунок 3).

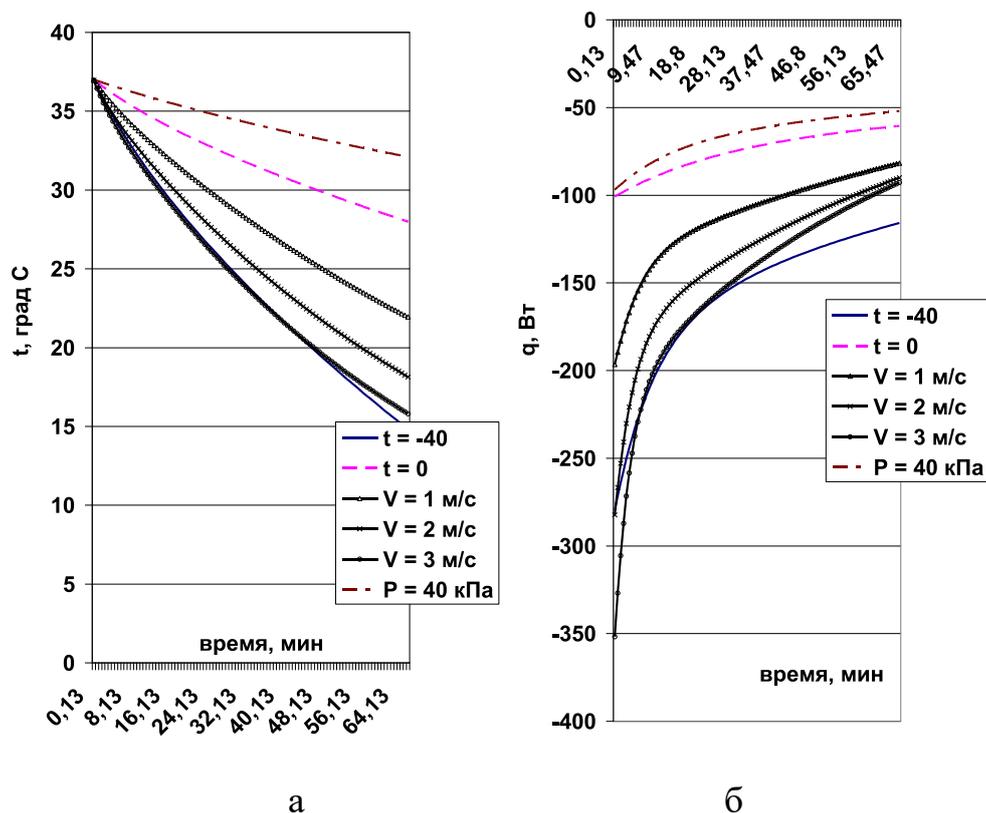


Рисунок 3. Изменение теплофизических параметров расчетного элемента (руки) в воздушной среде: а – среднемассовые температуры; б – тепловые потери

Анализ получаемых результатов позволяет исследовать механизмы работы системы терморегуляции человека в зависимости от условий внешней среды, а также оптимизировать элементы индивидуальных средств защиты от воздействия неблагоприятных температурных условий, путем внедрения дополнительных элементов в конструкцию одежды.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курмазенко Э.А. Конструирование теплообменных аппаратов систем жизнеобеспечения : Учеб. пособие / Э. А. Курмазенко; Моск. авиац. ин-т им. Серго Орджоникидзе М. : Изд-во МАИ, 1991.
2. Пичулин В.С. Математическое моделирование и проектирование индивидуальных систем жизнеобеспечения экипажей космических аппаратов : Учеб. пособие. – М.: МАИ, 2001. – 88 с.
3. Чичиндаев А. В. Теплообмен в системе «человек – окружающая среда» в условиях низких температур : монография / А. В. Чичиндаев, И. В. Хромова. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. - 214 с - 3000 экз. - ISBN 978-5-7782-3492-5.
4. I.V. Khromova, Heat Exchange in “Human body - Thermal protection – Environment System,” Journal of Physics: Conference Series, 2017. doi:10.1088/1742-6596/891/1/012084.

5. Березовский В.А. Колотилов Н.Н. Биофизические характеристики тканей человека. Справочник. – Киев.: Наук. думка, 1990. – 224 с.

6. Катунцев В.П., Филипенков С.Н. / Тепловое состояние космонавтов при автоматическом регулировании теплосъема в период внекорабельной деятельности с борта международной космической станции // Медицина экстремальных ситуаций. – 2019. – 10 с.

## **HUMAN THERMOREGULATION SYSTEM: THE RESEARCH OF FUNCTIONING IN THE LOW TEMPERATURES CONDITIONS**

*Chushkina Elizaveta Petrovna*, student, e-mail [chushkina\\_2000@mail.ru](mailto:chushkina_2000@mail.ru)

*Khromova Irina Vladimirovna*, Ph. D, Associate Professor,

e-mail: [xromova@corp.nstu.ru](mailto:xromova@corp.nstu.ru)

Novosibirsk State Technical University,

20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia

This article examines the issues of simulation and calculating thermal processes in the “Human body -Thermal protection -Environment” system at low temperatures, taking into account internal sources and heat transfer between the calculated elements and layers. It provides easy to calculate the mass flow rate of the coolant (blood) on the calculated elements. The heat transferred with the coolant current between the elements of the calculation and the layers to the thermal processes in the "Human Body - Environment" system has been developed and investigated. Ultimately, this study will contribute to the specialists in the development of the aircraft life-support systems.

*Keywords:* life support systems; heat and mass transfer processes; coolant, thermal resistance; heat loss; low temperatures.

## СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ:САМОЛЁТО- И ВЕРТОЛЁТОСТРОЕНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ДВИГАТЕЛЕ.....	5
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАКОНЦОВОК КРЫЛА САМОЛЁТА Бондаренко Кристина Павловна, Давыдова Евгения Владимировна, Сапожникова Виктория Дмитриевна, Нарышева Галина Геннадьевна .....	5
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА МЕТОДОМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ Важнов Данил Дмитриевич, Гордейчик Сергей Сергеевич, Черников Александр Викторович.....	10
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ SLM ТЕХНОЛОГИЙ 3D ПЕЧАТИ В АВИАСТРОЕНИИ Денисюк Данил Владимирович, Ивлев Дмитрий Юрьевич, Кузнецов Артур Олегович.....	15
ИНТЕГРИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ 3D ПЕЧАТИ В АВИАСТРОИТЕЛЬНУЮ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ Елистратов Андрей Александрович .....	19
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВХОДНОГО КОНФУЗОРА НА ПОДЪЕМНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯЧЕЙКИ МУЛЬТИРОТОРНОЙ ПЛАТФОРМЫ Куликов Виталий Владимирович .....	22
УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗМЕРНОГО ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ Малашенко Дмитрий Игоревич .....	26
КОНТРОЛЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ РАБОЧИХ ЖИДКОСТЕЙ В ЛЕТАТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ Репин Владимир Сергеевич, Мальцева Ирина Сергеевна, Каликина Наталья Алексеевна .....	30
<i>СЕКЦИЯ:ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ МАШИН .....</i>	<i>34</i>
ПРИМЕНЕНИЕ МКЭ В ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НДС ПЛАСТИНЫ С ОТВЕРСТИЕМ Артемьев Александр Евгеньевич.....	34
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УПРУГОЙ КОНСТРУКЦИИ Белова Екатерина Александровна, Белоусов Анатолий Иванович.....	37

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ПЛАСТИНОК Селиванов Юрий Сергеевич, Матвеев Константин Александрович .....	44
УСТОЙЧИВОСТЬ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ОРТОТРОПНЫХ ПЛАСТИН Михайлова Ольга Александровна, Матвеев Константин Александрович .....	49
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ МАХОВОГО КОЛЕСА Мосиенко Дмитрий Сергеевич, Пель Александр Николаевич .....	52
РАЗРУШЕНИЕ ХРУПКИХ ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ВБЛИЗИ ОБЛАСТИ КОНТАКТА СО СТАЛЬНЫМИ ШАРАМИ Пилипенко Даниил Игоревич, Леган Михаил Антонович, Федорова Наталья Витальевна .....	55
НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ, ОСЛАБЛЕННЫХ ОТВЕРСТИЕМ Романенко Евгений Игоревич, Пель Александр Николаевич .....	61
ФОРМИРОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ SiC <sub>v</sub> /SiC ИСКРОВЫМ ПЛАЗМЕННЫМ СПЕКАНИЕМ ПРЕКЕРАМИЧЕСКИХ БУМАГ Седанова Елизавета Павловна, Кашкаров Егор Борисович, Лидер Андрей Маркович, Сыртанов Максим Сергеевич .....	65
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦА, ИЗГОТОВЛЕННОГО НА 3D ПРИНТЕРЕ Серикбаев Михаил Сергеевич, Белоусов Анатолий Иванович .....	70
ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ОСЕСИММЕТРИЧНОМ НАГРУЖЕНИИ Томшин Виктор Михайлович, Пель Александр Николаевич .....	74
О РАСЧЕТЕ СОВМЕСТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРОВОДОВ И ОПОР ВЛ.	80
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СОСТАВНОЙ ПРЕГРАДЫ НА ФОРМИРУЕМОЕ УДАРНОЕ НАГРУЖЕНИЕ .....	86
<i>СЕКЦИЯ: ГИДРОАЭРОДИНАМИКА</i> .....	92
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБТЕКАНИЯ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНОЙ МОДЕЛИ БПЛА ПРИ ПОПАДАНИИ В ВОЗМУЩЕННЫЙ ПОТОК .....	92
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРА С ПЕРЕДНЕЙ ПОРИСТОЙ ВСТАВКОЙ ПОД УГЛОМ АТАКИ .....	98

ИССЛЕДОВАНИЕ УЧАСТКА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ВЯЗКОПЛАСТИЧНОЙ ЖИДКОСТИ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ .....	102
ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ПРИ ВЫДУВЕ В ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ.....	106
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПОЛУКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ В СДВИГОВОМ ПОТОКЕ.....	109
ПОЛУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ВДОЛЬ СТЕНКИ КАНАЛА ПРИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ .....	113
ГОРЕНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО-ПЕРЕМЕШАННОЙ МЕТАНО- ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В КОАКСИАЛЬНОМ РЕАКТОРЕ ВСТРЕЧНОГО НАПРАВЛЕНИЯ.....	116
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА ЗА ПРЯМЫМ СКАЧКОМ УПЛОТНЕНИЯ В УДАРНОЙ ТРУБЕ ПРЯМОТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ .....	119
ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДУШНЫХ СТРУЙ НА ПОВЕРХНОСТИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА.....	122
СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ ВО ВНУТРЕННЕМ ТРАКТЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ АВАРИЙНОГО СПАСЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ .....	126
О ВЗАИМОСВЯЗИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ И АЭРОИОННОГО СОСТАВА ВОЗДУХА ПОМЕЩЕНИЙ .....	130
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЁХМЕРНОГО СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРА С ПЕРЕДНЕЙ ГАЗОПРОНИЦАЕМОЙ ПОРИСТОЙ ВСТАВКОЙ ПОД УГЛОМ АТАКИ....	135
 <i>СЕКЦИЯ: ТЕХНИКА И ФИЗИКА НИЗКИХ АППАРАТУР. СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ .....</i>	
ГИПОДИНАМИЯ В НЕВЕСОМОСТИ: ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ КОМПЕНСАЦИИ.....	141
СВОБОДНАЯ КОНВЕКЦИЯ ОКОЛО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ ПОСТОЯННОМ ТЕПЛОВОМ ПОТОКЕ .....	145
МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ ОКОЛО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПЕРВОГО И ВТОРОГО РОДА.....	149
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ ОКОЛО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ.....	154

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО КОНДИЦИОНЕРА ДЛЯ АДМИНИСТРАТИВНОГО ЗДАНИЯ.....	158
ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ОРЕБРЕНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕННИКА-КОНДЕНСАТОРА СКВ .....	161
ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕННИКА-КОНДЕНСАТОРА СКВ .....	164
ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ОРЕБРЕНИЯ И ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕННИКА-КОНДЕНСАТОРА СКВ .....	168
СИСТЕМА ТЕРМОРЕГУЛЯЦИИ ЧЕЛОВЕКА: ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МЕХАНИЗМОВ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР .....	171

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**Наука Промышленность Оборона**

Труды XXI ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО–ТЕХНИЧЕСКОЙ  
КОНФЕРЕНЦИИ  
**ПОСВЯЩЕННОЙ 75-ЛЕТИЮ ПОБЕДЫ  
В ВЕЛИКОЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ВОЙНЕ**

г. Новосибирск, 7-9 октября 2020 г.

Том I

Под редакцией *С.Д. Саленко*

Компьютерная верстка

*Н.С. Белоусова*

*Е.М. Гриф*

*Д.В. Гынгазов*

*А.А. Нестерова*

*Е.Ю. Потанина*

Подписано в печать 03.11.2020 г. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная  
Тираж 25 экз. Уч.-изд.л. 10,46. Печ.л. 11,25. Заказ № 951

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20  
Тел: (383)-346-31-87